El mundo según la física

Jim Al-Khalili

Al igual que *Cuántica: Guía para perplejos*, *El mundo según la física* es un exponente difícilmente superable de la divulgación científica bien hecha, que aporta un imprescindible enfoque global, actual y clarificador acerca de las ideas centrales de la física moderna. Obra imbuida del espíritu de lo que es la ciencia, el escepticismo, el método experimental y el carácter de la ley física, en ella Jim Al-Khalili despeja de forma excepcional el entendimiento de la materia en unas páginas que también disfrutarán los aficionados a la filosofía ya la historia de las ciencias. «En este libro me he propuesto describir por qué la física es tan fascinante, por qué es una ciencia tan esencial y por qué es tan crucial para interpretar el mundo», declara. Y realmente lo consigue.

Jim Al-Khalili

El mundo según la física

ePub r1.0
Titivillus 04.08.2024

Título original: *The World According to Physics*
Jim Al-Khalili, 2020
Traducción: Dulcinea Otero-Piñeiro, 2021

Editor digital: Titivillus
Retoque de cubierta: *diego77*
ePub base r2.1

Prólogo

Este libro es una oda a la física.

Me enamoré por primera vez de la física cuando era adolescente. Reconozco que en parte se debió a que caí en la cuenta de que se me daba bien. La asignatura me parecía una mezcla atractiva de acertijos por resolver y sentido común, y disfrutaba trasteando con las ecuaciones, manipulando los símbolos algebraicos e introduciendo números para que desvelaran los secretos de la naturaleza. Pero también reparé en que, si quería obtener una respuesta satisfactoria para los numerosos interrogantes insondables que bullían en mi mente juvenil sobre la naturaleza del universo y el significado de la existencia, tendría que estudiar física. Quería saber de qué estamos hechos, de dónde venimos, si el universo tiene un principio o un fin, si es finito o si se extiende hasta la infinidad, qué era aquello de la mecánica cuántica que había oído mentar a mi padre, cuál es la naturaleza del tiempo. Mis ansias por dar respuesta a estas preguntas me animaron a dedicar la vida al estudio de la física. Ahora tengo respuestas para algunos de aquellos interrogantes; otras las sigo buscando.

Hay quien recurre a la religión o a alguna otra ideología o sistema de creencias para dar respuesta a los misterios de la vida. Pero para mí no hay nada como el cuidadoso proceso de formular hipótesis, ponerlas a prueba e inferir deducciones sobre el mundo, que son el sello distintivo del método científico. Los conocimientos alcanzados a través de la ciencia (y de la física en particular) sobre la composición y el funcionamiento del mundo son, en mi opinión, no ya una de las numerosas vías que existen, todas ellas igual de válidas, para acceder a la «verdad» sobre la realidad, sino la *única* forma fiable de lograrlo.

Es indudable que muchas personas no han caído nunca rendidas a los pies de la física como lo hice yo. Tal vez renunciaron a

estudiar ciencias porque decidieron (o quizá alguien les dijo) que es una materia difícil (o solo para bichos raros). Y, desde luego, entender las sutilezas de la mecánica cuántica puede acabar dando dolor de cabeza. Pero todo el mundo puede y debe valorar las maravillas del universo, y para adquirir unos conocimientos básicos no hace falta dedicar una vida entera a su estudio. En este libro me he propuesto describir por qué es tan fascinante la física, por qué es una ciencia tan esencial y por qué es crucial para interpretar el mundo. La física actual tiene un alcance y una extensión imponentes. Es asombroso que ahora sepamos de qué está hecho (casi) todo lo que vemos en el mundo y cómo se sostiene; que podamos rastrear la evolución de todo el universo hasta tan solo fracciones de segundo después del surgimiento del mismísimo espacio y el mismísimo tiempo; que a través del conocimiento de las leyes físicas que rigen la naturaleza hayamos desarrollado (y sigamos haciéndolo) tecnologías que nos han cambiado la vida. Mientras escribo estas líneas vuelvo a preguntarme: ¿cómo puede haber alguien que *no* ame la física?

Este libro aspira a ofrecer una introducción a algunas de las ideas más profundas y fundamentales de la física. Pero los temas tratados en él seguramente no coincidirán con los que estudiamos en el colegio. Para algunos lectores, el libro será una primera invitación a adentrarse en la física, una invitación que los seducirá para ahondar aún más en ella, tal vez incluso para dedicarle una vida de estudio y descubrimiento, como me pasó a mí. Para otras personas que quizá accedieran a ella con mal pie en una etapa anterior, podría servir como una nueva introducción. Muchas tal vez se limiten a maravillarse al descubrir lo lejos que ha llegado la humanidad en sus ansias por comprender.

Para transmitir unos conocimientos esenciales sobre lo que revela la física acerca de la naturaleza de nuestro mundo, he seleccionado una serie de conceptos fundamentales de la física moderna para ilustrar de qué manera están interconectados. Con este fin analizaremos el inmenso alcance de este panorama conceptual, que va desde la física de las escalas cósmicas más grandiosas hasta el nivel cuántico más insignificante; desde la aspiración de la comunidad física de unificar las leyes de la naturaleza hasta su búsqueda de los principios físicos más simples

capaces de gobernar la vida; desde las fronteras especulativas de la investigación teórica hasta la física que subyace a las experiencias y tecnologías de la vida cotidiana. Asimismo expondré algunos planteamientos novedosos: ideas que los físicos hemos aprendido a aceptar, pero que no hemos sabido transmitir a quienes están fuera de nuestro círculo de especialistas más estrecho. Por ejemplo, a una escala subatómica, las partículas individuales se comunican entre sí de manera instantánea a pesar de estar muy alejadas, lo que supone un desafío para el sentido común. Esta propiedad, llamada deslocalización, puede forzarnos a la larga a revisar toda la interpretación de la estructura del espacio en sí. Pero, por desgracia, muchas personas ajenas a la física y, de hecho, también algunas dedicadas a su estudio, no comprenden o malinterpretan lo que esto significa en realidad.

Una de las críticas que reciben muchos libros de divulgación científica que abordan conceptos fundamentales de la física (por lo común escritos por físicos teóricos) es que no siempre ayudan al público lego a captar el verdadero significado de esos conceptos. En mi opinión esto se debe a que los autores, físicos que de verdad los entienden y que escriben los artículos especializados y proponen teorías nuevas, no siempre son los mejores explicando sus propias ideas. Pero, al mismo tiempo, quienes tienen más experiencia y capacidad para informar sobre su trabajo al público general no siempre cuentan con un conocimiento lo bastante profundo de ciertos conceptos como para trasladar algo más que meras analogías. Y, aunque entiendas la física y seas capaz de transmitirla con eficacia (o eso espero) a personas que no saben física, no es pequeño el desafío de explicar términos como «invariancia gauge», «dualidad», «inflación eterna», «principio holográfico», «teoría de campos conforme», «espacios anti-de Sitter» o «energía del vacío» de un modo que aporte un entendimiento real de la física implicada y sin recurrir a matemáticas complejas. He puesto todo de mi parte para lograrlo, pero bien podría ocurrir que algunos lectores se queden con la impresión de que se puede hacer mejor. Y, por supuesto, será verdad.

No obstante, quien desee ahondar más en alguno de los temas que se abordan por encima en esta obra, encontrará muchos volúmenes que lo consiguen con brillantez. Al final del libro he

incluido una relación con algunos de los títulos que considero más accesibles y esclarecedores. Muchos de esos libros describen el devenir del avance científico (cómo ha evolucionado la física a lo largo de milenios desde los griegos de la Antigüedad; cómo se lograron ciertos descubrimientos, y cómo se propusieron y descartaron determinadas teorías e hipótesis). Estas obras suelen centrarse en las revoluciones que desbancaron concepciones previas sobre el universo, y hablan sobre los protagonistas principales de esos acontecimientos históricos. En esta obra breve, en cambio, no me centraré en lo lejos que hemos llegado, ni hablaré mucho sobre lo lejos que tenemos que llegar (porque no lo sé y, también, porque sospecho que aún nos queda un largo camino), pero sí abordaré en el capítulo 8 lo que *sabemos* que no sabemos.

Tampoco apoyaré aquí ninguna teoría particular. Por ejemplo, al hablar sobre la reconciliación de la mecánica cuántica con la relatividad general (el santo grial de la física teórica moderna) no me inclinaré por ninguno de los dos campos de trabajo existentes para llegar a ese objetivo: no defiendo la teoría de cuerdas ni soy un apasionado de la gravitación cuántica de lazos[1], puesto que ninguna de esas teorías cae dentro de mi especialidad; y en relación con el significado de la mecánica cuántica, no me entusiasma ni la interpretación de Copenhague ni la interpretación de la pluralidad de mundos[2]. Pero esto no impide que plantee cierta polémica sobre estos temas de tanto en tanto.

Además procuraré no enredarme demasiado en reflexiones filosóficas o metafísicas, aunque siempre surgen tentaciones al exponer algunas de las ideas más fundamentales de la física, ya sea en relación con la naturaleza del espacio y el tiempo, con las diversas interpretaciones de la mecánica cuántica, o incluso con el significado de la propia realidad. Con esto no digo que la física no necesite la filosofía. Tal vez le sorprenda saber que aún no nos hemos puesto de acuerdo ni tan siquiera en si el objetivo de la física consiste en averiguar cómo es el mundo *en realidad* (o sea, alcanzar alguna verdad definitiva que espera ahí fuera a ser descubierta), tal como pensaba Einstein, o si debe ser más bien la construcción de modelos del mundo para acercarnos al máximo a decir todo lo que se puede en la actualidad sobre la realidad, una realidad que tal vez no lleguemos a conocer nunca. Esto da una idea sobre lo

determinante que es la aportación de la filosofía para mi materia de estudio. Y en la cuestión anterior, estoy del lado de Einstein.

En resumen, defenderé que la física aporta las herramientas necesarias para comprender todo el universo. El estudio de la física es una búsqueda de explicaciones, pero para embarcarse en esa búsqueda debemos, en primer lugar, plantearnos las preguntas adecuadas, algo en lo que son muy buenos los filósofos.

De modo que comenzaremos este viaje dentro de un paradigma mental con la humildad adecuada, uno que, siendo sinceros, compartimos todos: niños, adultos y generaciones pasadas y futuras; un marco de desconocimiento. Si reflexionamos sobre lo que todavía no sabemos, podemos plantearnos cuál es la mejor manera de averiguarlo. Lo que nos ha brindado una imagen cada vez más precisa del mundo que conocemos y amamos son las numerosas preguntas que nos hemos formulado a lo largo de la historia de la humanidad.

He aquí el mundo según la física.

1. El asombro de comprender

Aunque los relatos siempre serán una parte esencial de la cultura humana, incluso en ciencia (y la vida sería mucho más pobre sin ellos), la ciencia moderna ha reemplazado en la actualidad muchos de los mitos antiguos y de las creencias supersticiosas asociadas a ellos. Un buen ejemplo de la desmitificación que han experimentado las estrategias para comprender el mundo lo ofrecen los mitos de la creación. Desde los albores de la historia, la humanidad ha inventado relatos sobre los orígenes del mundo, así como deidades instrumentales para su creación, desde el dios sumerio Anu, señor de los cielos, hasta los mitos griegos de Gaia, creada a partir del Caos, y los mitos del Génesis de las religiones abrahámicas, aún hoy consideradas verdades literales en numerosas sociedades del mundo. A muchas personas no científicas les podrá parecer que las teorías cosmológicas modernas sobre los orígenes del universo no son de por sí mejores que los mitos religiosos a los que sustituyen (y si consideramos algunas de las ideas más especulativas de la física teórica actual, puede que usted mismo opine que quienes piensan así tienen algo de razón). Pero a partir del análisis racional y de una observación cuidadosa (un proceso concienzudo de comprobación y acumulación de pruebas científicas, en lugar de la aceptación de historias y explicaciones con una fe ciega) podemos afirmar ahora con bastante convencimiento que sabemos mucho sobre el universo. También podemos decir con seguridad que los misterios que quedan no tienen por qué atribuirse a algo sobrenatural. Son fenómenos que aún no comprendemos y que esperamos entender algún día a través de la razón, el estudio racional y, sí…, la física.

Al contrario de lo que defenderán algunas personas, el método científico *no es* tan solo una forma más de contemplar el mundo, ni tampoco es otra ideología cultural o un sistema de creencias. Es el

procedimiento que nos permite conocer la naturaleza por ensayo y error, a través de la experimentación y la observación, a partir de una postura abierta a reemplazar ideas que se revelan erróneas o incompletas por otras mejores, y mediante el reconocimiento de patrones en la naturaleza y de belleza en las ecuaciones matemáticas que describen esos patrones. A lo largo de todo ese proceso profundizamos en el conocimiento existente y nos acercamos más a esa «verdad», a la forma en que es el mundo *realmente*.

No se puede negar que la comunidad científica está formada por personas con los mismos sueños y prejuicios que el resto de la humanidad, y con puntos de vista que no son del todo objetivos. Lo que un grupo científico denomina «consenso» otro lo considera un «dogma». Lo que se contempla como un hecho consolidado en una generación se observa como un ingenuo malentendido en la siguiente. Igual que en la religión, la política o el deporte, siempre se ha discutido dentro de la ciencia. A menudo corremos el peligro de que, mientras un problema científico permanece sin resolver o, al menos, abierto a la duda razonable, las posturas de cada bando se conviertan en férreas ideologías. Cada punto de vista tiene sus matices y complejidades, y sus defensores pueden volverse tan inflexibles como en cualquier otro debate ideológico. Y, al igual que sucede con los comportamientos sociales dentro de la religión, la política, la cultura, la raza o el género, a veces se necesita una nueva generación para romper con las ataduras del pasado y avanzar en el debate.

Pero hay otra diferencia crucial entre la ciencia y esas disciplinas. Una sola observación atenta o un solo resultado experimental pueden anular una idea científica generalizada o una vieja teoría que se queda obsoleta, y reemplazarlas por una concepción nueva del mundo. Esto significa que las teorías y explicaciones de los fenómenos naturales más fiables, las que más confianza infunden, son aquellas que han superado la prueba del tiempo. Es la Tierra la que gira alrededor del Sol y no al revés; el universo se está expandiendo, no es estático; la velocidad de la luz en el vacío siempre tiene el mismo valor, con independencia de la velocidad a la que se esté moviendo quien la mide; etcétera. Cuando se alcanza un descubrimiento científico importante que trastoca

nuestra cosmovisión, no todos los científicos lo aceptan de inmediato, pero ese es *su* problema. El avance de la ciencia es inexorable, lo cual, por cierto, *siempre* es bueno: el conocimiento y el esclarecimiento siempre son mejores que la ignorancia. Empezamos sin saber, pero perseguimos el conocimiento… y, aunque discutamos por el camino, no podemos cerrar los ojos a lo descubierto. En lo que respecta a la comprensión científica del mundo, la idea de que la «ignorancia es fuente de dicha» es una pamplina. En palabras de Douglas Adams: «En cualquier momento preferiría el asombro de comprender frente al asombro de la ignorancia»[3].

Lo que no sabemos

También es cierto que descubrimos sin cesar lo mucho que aún nos queda por conocer. ¡Cuanto más crece el conocimiento, más conscientes somos de nuestra ignorancia! En cierto modo, esta es la situación en la que se encuentra la física en este momento, tal como explicaré. Estamos en un instante de la historia que muchos especialistas de la física contemplan, si no como una crisis de la disciplina, sí al menos como una olla a presión. Da la sensación de que algo tiene que ceder. Hace algunas décadas físicos tan notables como Stephen Hawking plantearon: «¿Se vislumbra el fin de la física teórica»[4] con una «teoría del todo» posiblemente a la vuelta de la esquina? Decían que solo faltaban unos cuantos detalles. Pero se equivocaban, y no era la primera vez. Los físicos habían manifestado impresiones similares hacia el fin del siglo XIX; después llegó una explosión de descubrimientos (el electrón, la radiactividad y los rayos X) que no podían explicarse con la física conocida de aquel entonces y que propiciaron el nacimiento de la física moderna. Muchos físicos tienen hoy la sensación de que estamos al borde de otra revolución dentro de la física del mismo calado que la de hace un siglo con el advenimiento de la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica. No digo que estemos a punto de descubrir algún fenómeno fundamental, como los rayos X o la radiactividad, pero quizá haga falta otro Einstein para acabar con el estancamiento actual.

El Gran Colisionador de Hadrones no ha dado continuidad al logro que alcanzó en 2012 con la detección del bosón de Higgs, que confirmó la existencia del campo de Higgs (del que hablaré más adelante); muchos físicos esperaban que a estas alturas ya se hubieran descubierto otras partículas nuevas, lo que ayudaría a resolver viejos enigmas. Y seguimos sin esclarecer la naturaleza de la materia oscura que mantiene cohesionadas las galaxias o de la energía oscura que está desgarrando el universo; ni tampoco tenemos respuestas para preguntas esenciales como por qué hay más materia que antimateria; por qué están tan bien afinadas las propiedades del universo para permitir la existencia de estrellas, planetas y la propia vida; si hay un multiverso; o si hubo algo antes de la Gran Explosión (*Big Bang*) que creó el universo que observamos. Aún queda mucho por explicar. Y, sin embargo, cuesta no asombrarse ante lo logrado hasta ahora. Aunque podría resultar que algunas teorías científicas estén conectadas entre sí a un nivel más profundo de lo que pensamos, mientras que otras tal vez se revelen completamente equivocadas, nadie puede negar lo lejos que hemos llegado.

En ocasiones, con la obtención de nuevos datos empíricos reparamos en que andamos descarriados. Otras veces basta con refinar una idea que se revela no errónea, sino una ligera aproximación que se debe perfeccionar para adquirir una visión más fiel de la realidad. Hay algunos campos fundamentales de la física con los que no estamos completamente satisfechos, de los que en el fondo sabemos que no se ha dicho la última palabra, pero en los que nos seguimos basando de momento porque nos resultan útiles. Un buen ejemplo lo ofrece la ley de la gravitación universal de Newton. Todavía porta el grandilocuente apelativo de «*ley*» porque los científicos de aquella época estaban tan convencidos de que era algo definitivo que le asignaron una categoría superior a la de una mera teoría. El apelativo se quedó, a pesar de que ahora sabemos que le atribuyeron una credibilidad inmerecida. La teoría general de la relatividad de Einstein (nótese que recibe el nombre de «*teoría*») reemplazó la ley de Newton porque aporta una explicación más profunda y precisa de la gravitación. Y, sin embargo, seguimos usando las ecuaciones de Newton para calcular las trayectorias de vuelo de las misiones espaciales. Las predicciones

de la mecánica newtoniana no son tan precisas como las de la relatividad de Einstein, pero siguen siendo lo bastante buenas para casi cualquier cálculo de la vida cotidiana.

Otra teoría en la que nos seguimos basando es el modelo estándar de la física de partículas. Consiste en una amalgama de dos teorías matemáticas independientes llamadas modelo electrodébil y cromodinámica cuántica, y que juntas describen las propiedades de todas las partículas fundamentales conocidas y de las fuerzas que actúan entre ellas. Algunos físicos contemplan el modelo estándar como un mero recurso provisional hasta que se descubra una teoría unificada más exacta. Y, sin embargo, es llamativo que en su estado actual el modelo estándar pueda decirnos todo lo que necesitamos saber sobre la naturaleza de la materia: cómo y por qué se organizan los electrones en torno a los núcleos atómicos, cómo interaccionan los átomos para formar moléculas, cómo se ensamblan esas moléculas para integrar todo lo que nos rodea, cómo interacciona la materia con la luz (y, por tanto, cómo se explican casi todos los fenómenos). Un solo aspecto de ella, la electrodinámica cuántica, sustenta toda la química al nivel más profundo.

Pero el modelo estándar no puede ser la última palabra sobre la naturaleza de la materia, porque no incluye la gravitación y no explica la materia oscura ni la energía oscura, y entre las dos conforman la mayoría de lo que compone el universo. Dar respuesta a algunas preguntas conduce de manera natural a otras, y los especialistas siguen buscando la física que hay «más allá del modelo estándar» con la intención de resolver estos interrogantes persistentes, pero cruciales.

Cómo avanzamos

Más que ninguna otra disciplina, la física avanza a través de la interacción continua entre la teoría y la experimentación. Las teorías solo superan la prueba del tiempo si los experimentos siguen confirmando sus pronósticos. Una teoría es buena cuando emite predicciones novedosas que se pueden demostrar en el laboratorio, pero si esos resultados experimentales entran en conflicto con la teoría, entonces hay que modificarla o incluso descartarla. Y al

revés, los experimentos de laboratorio apuntan a veces hacia fenómenos inexplicados que exigen nuevas interpretaciones teóricas. En ninguna otra ciencia asistimos a una colaboración tan hermosa. Los teoremas de las matemáticas puras se demuestran a través de la lógica, la deducción y el empleo de verdades axiomáticas. No precisan una validación en el mundo real. En cambio, la geología, la etología o la sicología conductual son en su mayoría ciencias observacionales donde el avance del conocimiento se logra a través de una recopilación meticulosa de datos extraídos del mundo natural o a través de pruebas de laboratorio diseñadas con esmero. Pero la física solo consigue avanzar cuando la teoría y la experimentación trabajan codo con codo, afianzándose y mostrándose mutuamente el siguiente asidero para ascender por el precipicio.

Arrojar luz sobre lo desconocido es otra buena metáfora sobre cómo desarrollan los científicos sus teorías y modelos, y cómo diseñan sus experimentos para poner a prueba algún aspecto relacionado con el funcionamiento del mundo. Cuando se trata de buscar ideas nuevas en física encontramos dos grandes clases de investigadores en términos generales. Imagine que vuelve a casa caminando una noche oscura y sin luna y de pronto se da cuenta de que tiene un agujero en el bolsillo del abrigo por el que se le han caído las llaves en algún punto del trecho recorrido. Usted sabe que tienen que estar en algún lugar del suelo por el que acaba de transitar, así que vuelve sobre sus pasos. Pero ¿mirará tan solo en las partes del pavimento iluminadas, las que están justo debajo de las farolas que hay por el camino? Al fin y al cabo, aunque esas zonas no cubren más que una parte del recorrido, al menos tiene la seguridad de que encontrará las llaves si están en alguna de ellas. ¿O buscará a tientas en las manchas de oscuridad que quedan entre cada haz de luz artificial? Lo más probable es que las llaves se cayeran en alguna de ellas, pero también será más difícil encontrarlas.

De manera similar, hay físicos aficionados a las farolas y estudiosos de la oscuridad. Los primeros van a lo seguro y desarrollan teorías que se pueden comprobar mediante la experimentación (miran allí donde se puede ver). Esto significa que suelen ser menos ambiciosos en la formulación de ideas novedosas,

pero logran un índice mayor de éxito para el avance del conocimiento, aunque de manera progresiva: con evolución, no con revolución. En cambio, los estudiosos de la oscuridad son los que proponen las ideas más originales y especulativas, las que no resultan nada fáciles de comprobar. Tienen menos posibilidades de éxito, pero la recompensa es mayor si dan en el clavo y sus descubrimientos pueden desencadenar cambios de paradigma en el conocimiento. Esta diferencia es mucho más acusada dentro de la física que en cualquier otra ciencia.

Entiendo a quienes se sienten defraudados por los investigadores y los soñadores que trabajan a menudo en campos esotéricos, como la cosmología y la teoría de cuerdas, porque estas son las personas que no reparan en absoluto en añadir unas cuantas dimensiones aquí o allá si con ello consiguen unas matemáticas más bellas, ni en conjeturar una infinidad de universos paralelos si con ello reducen la rareza del nuestro. Pero ha habido algunos ejemplos famosos de investigadores que han encontrado oro. El genio del siglo XX Paul Dirac fue un hombre que se guio por la belleza de sus ecuaciones, lo que lo condujo a postular la existencia de la antimateria varios años antes de su descubrimiento en 1932. También están los físicos Murray Gell-Mann y George Zweig, quienes a mediados de la década de 1960 predijeron los cuarks, de forma independiente, cuando no había ningún indicio experimental que apuntara hacia la existencia de estas partículas. Peter Higgs tuvo que esperar medio siglo para que se descubriera el bosón y se confirmara la teoría a los que dio nombre. Hasta el pionero de la física cuántica Erwin Schrödinger llegó a la ecuación epónima sin nada más que una suposición inspirada. Dio con la fórmula matemática correcta de la ecuación a pesar de que aún no sabía cómo interpretar la solución.

¿Qué dotes únicas tenían todos estos físicos? ¿Era la intuición? ¿Era un sexto sentido con el que se olían dónde se esconden los secretos de la naturaleza? Tal vez. El físico galardonado con el Nobel Steven Weinberg cree que es la belleza estética de las matemáticas lo que ha guiado a grandes teóricos como Paul Dirac y al excelso físico escocés decimonónico James Clerk Maxwell.

Pero también es cierto que ninguno de estos físicos trabajó aislado, y que sus ideas debían concordar con todos los hechos demostrados y las observaciones experimentales.

En busca de la sencillez

La verdadera belleza de la física reside, en mi opinión, no solo en ecuaciones abstractas o en resultados experimentales sorprendentes, sino en los principios más profundos que rigen el mundo tal como es. Se trata de una belleza no menos admirable que un atardecer hermoso o una gran obra de arte, como un cuadro de Leonardo da Vinci o una sonata de Mozart. Es una belleza que no radica en la sorprendente profundidad de las leyes de la naturaleza, sino en explicaciones subyacentes de una sencillez engañosa (cuando las tenemos) acerca de la procedencia de esas leyes [5].

Un ejemplo perfecto de la persecución de la sencillez lo ofrece el largo y constante viaje de la ciencia para descubrir las unidades esenciales de la materia. Eche una ojeada a su alrededor. Piense en la gran variedad de materiales que conforman el mundo cotidiano: hormigón, vidrio, metales, plásticos, madera, tela, alimentos, papel, compuestos químicos, plantas, gatos, personas… millones de sustancias distintas, cada una de ellas con sus propios atributos distintivos: blando, duro, líquido, brillante, maleable, caliente, frío… si no supiéramos nada de física o de química, cabría imaginar que la mayoría de esos materiales tiene muy poco en común entre sí; y, sin embargo, sabemos que todo se compone de átomos, y que solo hay una cantidad finita de distintos tipos de átomos.

Pero la búsqueda de una sencillez cada vez más profunda no termina ahí. Las cavilaciones sobre la estructura de la materia se remontan al siglo V a. C. en la antigua Grecia, cuando Empédocles propuso por primera vez que la materia consiste en cuatro «elementos» esenciales (la «cuádruple raíz material» de todo): tierra, agua, aire y fuego. Y, en contraste con esta idea sencilla, Leucipo y su discípulo Demócrito, otros dos filósofos, propusieron que toda la materia se compone de «átomos» indivisibles. Sin embargo, aquellas dos ideas prometedoras chocaban entre sí. Aunque Demócrito creía que la materia está hecha en última instancia de elementos constitutivos fundamentales, pensaba que habría una variedad infinita de átomos distintos, mientras que Empédocles, que proponía que todo está formado en última instancia de tan solo cuatro elementos, sostenía que esos elementos eran continuos e infinitamente divisibles. Tanto Platón como Aristóteles difundieron

esta última teoría y negaron el atomismo de Demócrito, convencidos de que su mecánico materialismo simplista no podía generar la rica diversidad de belleza y forma que hay en el mundo.

Lo que hicieron los filósofos griegos no era verdadera ciencia en el sentido que le damos hoy día (al margen de unas pocas excepciones notables, como Aristóteles —el observador— y Arquímedes —el experimentador—). Sus teorías consistían a menudo en poco más que conceptos filosóficos idealizados. En cambio hoy, a través de las herramientas de la ciencia moderna, sabemos que estas dos ideas de la Antigüedad (el atomismo y la cuádruple raíz material) iban bien encaminadas, al menos en esencia: que toda la materia que compone el mundo, incluido el cuerpo humano y todo lo que vemos en el espacio (el Sol, la Luna y las estrellas), está formado por menos de un centenar de tipos diferentes de átomos. Ahora también sabemos que los átomos tienen estructura interna. Consisten en densos núcleos diminutos envueltos por nubes de electrones, mientras que el núcleo de por sí está constituido por elementos más pequeños aún: protones y neutrones, que a su vez se componen de unidades constitutivas aún más fundamentales llamadas cuarks.

Por tanto, a pesar de la aparente complejidad de la materia y de la inconmensurable variedad de sustancias que se pueden crear a partir de los elementos químicos, lo cierto es que la persecución de la simplicidad por parte de los antiguos no fue lo bastante lejos. Según la concepción física actual, toda la materia que vemos en el mundo está formada no por los cuatro elementos clásicos de los griegos, sino por tan solo tres partículas esenciales: el cuark arriba, el cuark abajo y el electrón. Eso es todo. El resto son solo detalles.

Y, sin embargo, la física no se limita a clasificar los elementos que componen el mundo. Consiste en hallar las explicaciones correctas para los fenómenos naturales que observamos y para los principios y mecanismos subyacentes que dan cuenta de ellos. Aunque los griegos de la Antigüedad mantuvieran debates apasionados sobre la realidad de los átomos o la relación abstracta entre la «materia» y la «forma», no tenían ni idea de cómo explicar los terremotos o los rayos, no digamos ya sucesos astronómicos como las fases de la Luna o la aparición ocasional de algún cometa en el firmamento (si bien eso no les impidió intentarlo).

Hemos recorrido un largo camino desde aquellos griegos de la Antigüedad y, sin embargo, aún nos queda muchísimo por entender y explicar. La física que expongo en este libro consiste, en su mayoría, en aquello que sabemos con seguridad. A lo largo de él explicaré *por qué* estamos convencidos de ello y señalaré lo que es especulativo y en qué campos podría haber cierta libertad de acción. Como es natural, puedo anticipar que algunas partes de la historia se quedarán obsoletas en el futuro. De hecho, es posible que el día siguiente a la publicación de este libro se produzca un descubrimiento importante que obligue a revisar algún aspecto de nuestro entendimiento presente. Pero así es la naturaleza de la ciencia. La mayoría de lo que usted leerá aquí se ha consolidado más allá de toda duda razonable como la forma en que el mundo *es*.

En el próximo capítulo abordo la idea de la escala. Ninguna otra ciencia abarca con tanto atrevimiento un rango tan vasto de escalas, tiempo, espacio y energías como la física, desde el mundo cuántico, inconcebiblemente diminuto, hasta todo el conjunto del cosmos, y desde un abrir y cerrar de ojos hasta la eternidad.

Tras hacernos una idea de todo lo que es capaz de explicar la física, emprenderemos en serio nuestro viaje partiendo de los tres «pilares» de la física moderna: relatividad, mecánica cuántica y termodinámica. Para pintar el cuadro del mundo que nos ha desvelado la física, debemos preparar el lienzo en primer lugar, y en este caso el lienzo lo conforman el espacio y el tiempo. Todo lo que ocurre en el universo se reduce a acontecimientos que se producen en algún lugar del espacio y algún instante temporal. Y, sin embargo, en el capítulo 3 veremos que el lienzo no se puede separar de la pintura. El espacio y el tiempo son en sí mismos una parte integrante de la realidad. Tal vez le sorprenda descubrir lo distinta que es la concepción en física del espacio y el tiempo de la noción cotidiana que adquirimos sobre ellos a partir del sentido común, porque la primera se basa en la teoría de la relatividad de Einstein, la cual describe la naturaleza del espacio y el tiempo, y define cómo nos planteamos la estructura del cosmos. En cuanto tengamos listo el lienzo pasaremos a preparar las pinturas. En el capítulo 4 defino lo que se entiende en física por materia y energía, la masa con que se hace el pan del universo: en qué consiste, cómo se originó y cómo se comporta. Podemos contemplar este capítulo como un

complemento del anterior, porque también describe la relación íntima que mantienen la materia y la energía con el espacio y el tiempo en los que existen.

En el capítulo 5 me interno en el mundo de lo muy pequeño, ampliando y bajando al estudio de la naturaleza de los elementos constitutivos fundamentales de la materia. Este es el mundo cuántico, el segundo pilar de la física moderna, donde la materia se comporta de una forma muy distinta a la experiencia que tenemos de ella en la vida cotidiana, y donde se comprueba que lo real se desdibuja cada vez más. Y, sin embargo, el entendimiento de la cuántica es mucho más que una ilusión o un mero divertimento intelectual; sin el conocimiento de las reglas que rigen los componentes esenciales de la materia y la energía, no habríamos podido crear el mundo tecnológico moderno.

En el capítulo 6 nos apartamos del universo cuántico para ver qué sucede si juntamos muchas partículas para crear sistemas más grandes y más complejos. ¿Qué se entiende en física por orden, desorden, complejidad, entropía y caos? Aquí nos toparemos con el tercer pilar de la física, la termodinámica (el estudio del calor, la energía y las propiedades de la materia a granel). Será inevitable plantearse qué convierte la vida en algo tan especial. ¿Por qué es tan diferente la materia viva de la materia inerte? Al fin y al cabo, la vida tiene que estar sujeta a las mismas leyes de la física que todo lo demás. En otras palabras, ¿puede ayudarnos la física a entender la diferencia entre la química y la biología?

En el capítulo 7 analizo una de las ideas más profundas de la física: la noción de la unificación. La forma en que una vez y otra hemos buscado, y encontrado, leyes universales que engloban fenómenos naturales aparentemente dispares bajo una descripción o teoría unificadoras. El capítulo termina con una ojeada a algunos de los investigadores más aventajados en la búsqueda de una «teoría del todo» integral para la física.

En el capítulo 8 habremos llegado al límite del conocimiento actual sobre el universo físico, y por fin podremos hundir las puntas de los pies en el vasto océano de lo desconocido. En él examino algunos de los misterios con los que nos devanamos los sesos en la actualidad y especulo sobre si estamos cerca de resolverlos.

En el penúltimo capítulo expongo que la interacción entre la

teoría y la experimentación dentro de la física ha dado lugar a tecnologías sobre las que se asienta el mundo moderno. Por ejemplo, sin la mecánica cuántica no entenderíamos el comportamiento de los semiconductores ni habríamos inventado los chips de silicio, que son la base de toda la electrónica moderna, y yo no estaría ahora tecleando estas palabras en un ordenador portátil. Asimismo dedicaré una mirada al futuro y emitiré un pronóstico sobre la revolución inconcebible que supondrá para el mundo la investigación actual en tecnologías cuánticas.

En el capítulo final analizo el concepto de verdad científica, especialmente en el seno de la sociedad de la «posverdad» en la que muchas personas recelan de la ciencia. ¿Qué diferencia el avance de la ciencia de otras actividades humanas? ¿Existe eso que llaman verdad científica absoluta? Y si el objeto de la ciencia consiste en buscar verdades profundas sobre la naturaleza, ¿cómo debería actuar la comunidad científica para convencer a una sociedad más amplia del valor del quehacer científico: la emisión y comprobación de hipótesis, y su rechazo cuando no concuerdan con los datos? ¿Llegará a acabarse la ciencia algún día cuando sepamos todo lo que hay que saber? ¿O proseguirá la búsqueda de respuestas para hundirnos cada vez más en un abismo que nunca dejará de crecer?

En el prólogo prometí no enredarme demasiado en cavilaciones filosóficas, y ahora estoy haciendo justo eso sin haber pasado de la introducción. Respiremos hondo para volver a empezar con delicadeza con el concepto de escala.

2. La escala

A diferencia de la filosofía, la lógica o las matemáticas puras, la física es una ciencia tanto empírica como cuantitativa [6]. Se basa en la comprobación y constatación de ideas a través de la observación, medición y experimentación reproducibles. Aunque en física se pueden proponer a veces teorías matemáticas exóticas o estrafalarias, la única medida auténtica de su eficacia y poder reside en si describen fenómenos del mundo real que permitan comprobarlas. Esta es la razón por la que Stephen Hawking no recibió nunca el premio Nobel a mediados de la década de 1970 por su trabajo sobre la energía que irradian los agujeros negros, un fenómeno que se conoce como radiación de Hawking: el Nobel solo se otorga a teorías o descubrimientos confirmados de manera experimental. De igual modo, Peter Higgs y otros que emitieron una predicción similar tuvieron que esperar medio siglo hasta la confirmación del bosón de Higgs con el Gran Colisionador de Hadrones.

Esto también explica por qué la física como disciplina científica no empezó a lograr avances verdaderamente significativos hasta que se inventaron las herramientas e instrumentos necesarios para comprobar las teorías (a través de la observación, la experimentación y la medición cuantitativa). Puede que los griegos de la Antigüedad fueran brillantes para el pensamiento abstracto (lo que impulsó disciplinas como la filosofía y la geometría hasta un grado de sofisticación que sigue siendo válido en la actualidad), pero, exceptuando a Arquímedes, no cosecharon mucha fama por sus aportaciones experimentales. El mundo de la física alcanzó su verdadera madurez en el siglo XVII gracias en gran medida a la invención de los instrumentos más importantes para todas las ciencias: el telescopio y el microscopio.

La física no habría llegado demasiado lejos si solo pudiéramos

interpretar el mundo que captamos a simple vista. El rango de las longitudes de onda que es capaz de percibir el ojo humano no es más que una fracción de todo el espectro electromagnético y, además, la vista humana está restringida al discernimiento de objetos que ni son demasiado pequeños ni están demasiado lejos. Aunque en teoría la vista podría alcanzar hasta el infinito siempre que los ojos recibieran una cantidad suficiente de fotones (¡y siempre que contáramos con un tiempo infinito para que llegaran hasta nosotros!), es probable que con ello no consiguiéramos datos muy útiles. Pero la invención del microscopio y el telescopio abrió dos ventanas al mundo que incrementaron de forma espectacular el conocimiento humano con la ampliación de lo muy pequeño y el acercamiento de lo muy lejano. Al fin pudimos realizar observaciones y mediciones minuciosas para comprobar y refinar nuestras ideas.

El 7 de enero de 1610 Galileo dirigió hacia los cielos su catalejo modificado y perfeccionado, y desterró para siempre la concepción de que ocupamos el centro del cosmos[7]. Vio cuatro satélites de Júpiter y a partir de ahí dedujo con acierto que el modelo heliocéntrico de Copérnico era correcto (que la Tierra gira alrededor del Sol y no al revés). Con la observación de objetos en órbita alrededor de Júpiter constató que no todos los cuerpos celestes giran alrededor de nosotros. La Tierra no ocupa el centro del universo, sino que es un planeta más, como Júpiter, Venus y Marte, en órbita alrededor del Sol. Con este descubrimiento Galileo dio inicio a la astronomía moderna.

Pero Galileo no solo revolucionó la astronomía. También contribuyó a asentar el método científico sobre unos cimientos más sólidos. A partir del trabajo del físico árabe medieval Ibn al-Haytam, conocido en Occidente como Alhacén, Galileo «matematizó» la física. Con el desarrollo de las relaciones matemáticas que describen, y de hecho predicen, los movimientos de los objetos, demostró más allá de toda duda que, tal y como lo expresó él mismo, el libro de la naturaleza «está escrito en lengua matemática»[8].

En el extremo opuesto de la escala al que ocupaban las observaciones astronómicas de Galileo, Robert Hooke y Antoni van Leeuwenhoek desvelaron un mundo nuevo muy diferente con el

microscopio. El famoso libro de Hooke titulado *Micrographia*, publicado en 1665, contiene dibujos formidables de mundos en miniatura, desde el ojo de una mosca y la vellosidad del lomo de una pulga hasta células vegetales diferenciadas que nadie había observado jamás.

En la actualidad la humanidad cuenta con un rango fabuloso de escalas abiertas a la exploración. Con los microscopios electrónicos llegan a verse átomos individuales, de tan solo una diezmillonésima de un milímetro de ancho, y con los telescopios gigantes alcanzamos a vislumbrar los confines más lejanos del universo observable, situados a 46 500 millones de años-luz de distancia [9]. Ninguna otra ciencia estudia un rango así de escalas. Es más, olvídese de las resoluciones del tamaño de un átomo. Un equipo de la Universidad de St. Andrews de Escocia me enseñó hace poco algo alucinante para medir longitudes ínfimas. Estos investigadores han ideado una manera de medir la longitud de onda de la luz usando un instrumento llamado ondímetro, con una precisión de un solo attómetro (o la milésima parte del diámetro de un protón). Lo lograron haciendo pasar el haz de un láser a través de una fibra óptica corta, lo que moldea las ondas de la luz y crea un patrón granulado llamado «moteado», y observando a continuación cómo cambia este patrón con el más mínimo ajuste de la longitud de onda de la luz.

Pero la física no solo estudia todo el rango de las escalas de longitud; también mide el tiempo, desde las fracciones más insignificantes del parpadeo de un ojo hasta las eternidades cósmicas. He aquí un ejemplo impactante. Durante un experimento realizado en Alemania en 2016 un equipo de físicos midió un intervalo temporal casi demasiado breve para llegar a concebirlo. Estaban estudiando un fenómeno llamado efecto fotoeléctrico en el que los fotones liberan electrones al impactar contra átomos. Einstein había explicado el proceso por primera vez de forma correcta en 1905 en un famoso artículo por el que le otorgaron el premio Nobel muchos años después (y no por su trabajo sobre las teorías de la relatividad, como cabría pensar). Hoy en día este proceso de arrancar electrones de los materiales se denomina fotoemisión y es el que permite convertir la luz del Sol en electricidad con placas solares.

En el experimento de 2016 se usaron dos láseres especiales. El primero de ellos lanzaba un pulso de una brevedad inimaginable de luz ultravioleta contra un chorro de helio gaseoso. Este pulso duraba tan solo una décima de la milbillonésima parte de un segundo o, lo que es lo mismo, 100 attosegundos (un attosegundo equivale a 10^{-18} segundos)[10]. El otro láser del experimento era menos energético (su frecuencia caía en el rango de la luz infrarroja) y la duración de su pulso era algo más larga que la del primero. Su objetivo consistía en capturar los electrones fugados para que los investigadores pudieran calcular cuánto tiempo había hecho falta para extraerlos. El resultado obtenido arrojó un espacio de tiempo aún más veloz: la décima parte de la duración del primer pulso del láser. Lo curioso de este resultado es que los electrones arrancados se resistían un tanto. Es decir, cada átomo de helio contiene dos electrones, y los que salían arrancados notaban el influjo del compañero que dejaban atrás, el cual, aunque fuera de forma muy leve, retrasaba el proceso de expulsión. Es asombroso que un fenómeno físico que dura tan solo unos cuantos attosegundos pueda medirse de esta manera en un laboratorio.

Dentro del campo de la física en el que me muevo yo hay procesos aún más veloces que este, aunque no se pueden medir directamente en laboratorio. En lugar de eso, desarrollamos modelos informáticos para explicar las distintas estructuras de los núcleos atómicos y los procesos que tienen lugar cuando dos núcleos chocan y reaccionan. Por ejemplo, el primer paso de la fusión nuclear (cuando dos núcleos pesados se unen cual gotas de agua que se funden entre sí para formar un núcleo más pesado aún) implica la reorganización súbita de todos los protones y neutrones de ambos núcleos en uno nuevo combinado. Este proceso cuántico dura menos de un zeptosegundo (10^{-21} segundos).

En el extremo opuesto de la escala del tiempo, cosmólogos y astrónomos han logrado desentrañar la edad (de nuestra parte) del universo con tal precisión que ahora estamos seguros de que la Gran Explosión ocurrió 13 824 millones de años atrás (unos cuantos millones de años arriba o abajo). Tal vez a alguien le parezca arrogante este convencimiento nuestro sobre la precisión de ese valor (y hasta imposible de creer para quienes se aferran a la idea medieval de que el universo solo tiene seis mil años de antigüedad),

así que permítame explicar de dónde sale esa cifra.

Déjeme exponer en primer lugar un par de afirmaciones en las que profundizaré un poco más adelante, pero de las que ahora mismo solo diré que ambas están bien respaldadas por pruebas observacionales: (1) que las leyes de la física son iguales en todos los lugares del universo y (2) que el espacio presenta el mismo aspecto en todas direcciones (con la misma densidad y distribución de galaxias). Esto permite confiar en que las observaciones efectuadas desde la Tierra (o mediante observatorios satelitales en órbita alrededor de nuestro planeta) se pueden usar para averiguar cómo es todo el cosmos. Eso ha permitido conocer la edad del universo de varias maneras diferentes.

Por ejemplo, el estudio de las estrellas de nuestra Galaxia ha desvelado mucha información. Sabemos cuánto duran las estrellas dependiendo de su tamaño y brillo, lo que determina la rapidez con que se queman mediante procesos de fusión termonuclear. Esto significa que podemos inferir la edad de las estrellas más antiguas, lo que pone un límite a la edad mínima de nuestra Galaxia, lo que a su vez arroja un valor mínimo para la edad del universo. Como las estrellas más viejas de la Galaxia tienen unos 12 000 millones de años, el universo no puede tener una edad inferior a esa.

Además, medir el brillo y el color de la luz que llega a los telescopios procedente de galaxias distantes permite calcular a qué velocidad se expande el universo, tanto ahora como en el pasado. Cuanto más lejos miramos, más nos remontamos en el tiempo, puesto que la luz que recibimos habrá tardado miles de millones de años en llegar hasta nosotros y, por tanto, nos brinda información sobre el pasado distante. Y, si sabemos a qué velocidad se ha expandido el universo, podemos hacer retroceder el reloj hasta un tiempo en el que todo estaba apretado entre sí en un mismo lugar: el instante en el que nació el universo.

Por otra parte, el estudio de las variaciones minúsculas de temperatura que ha sufrido el espacio profundo (el denominado fondo cósmico de microondas) brinda una instantánea exacta del universo tal como era antes de que se hubiera formado ninguna estrella o galaxia, tan solo unos cuantos cientos de miles de años después de la Gran Explosión. Esto permite determinar la edad del universo con mayor precisión aún.

Podemos afirmar, por tanto, que la física permite conocer el universo a las escalas de distancia y de tiempo más pequeñas y más grandes, pero a mí me parece igual de extraordinario que hayamos descubierto leyes de la física que tienen validez en todos esos rangos. Tal vez a usted no le cause tanta sorpresa; tal vez le parezca natural que las leyes de la naturaleza que operan a escala humana sean las mismas que actúan a otras escalas de distancia, de tiempo y de energía. Pero no es algo tan evidente.

Para analizar esto con más profundidad introduciré tres conceptos que no siempre se enseñan a los estudiantes de física, pero que sin duda deberían conocer: la universalidad, la simetría y el reduccionismo.

Universalidad

Isaac Newton[11] descubrió la primera ley «universal»[12] de la física. Si vio o no caer una manzana de un árbol en el campo de su madre, lo que lo condujo al desarrollo de su ley de la gravitación, o los detalles de la fórmula matemática que articula su ley, no tienen ninguna importancia aquí. La cuestión clave es que Newton se dio cuenta de que la fuerza que empuja una manzana hacia el suelo tiene el mismo origen que la fuerza que mantiene la Luna en órbita alrededor de la Tierra, es decir, que una relación matemática simple sirve para describir igual de bien ambos procesos. El comportamiento de los objetos debido a la gravedad aquí en la Tierra es equivalente al comportamiento de la Luna en su giro alrededor de la Tierra, de los planetas alrededor del Sol y del Sol alrededor del centro de la Galaxia. La fuerza gravitatoria que da forma a la vida en la Tierra es la misma que ha modelado todo el universo desde la Gran Explosión. El hecho de que la descripción de la gravitación de Newton quedara desbancada más de dos siglos después por la de Einstein, mucho más precisa, no empaña esta apreciación sobre la «universalidad» de la gravitación.

La teoría general de la relatividad de Einstein, que mejoraba las predicciones de Newton, también brindaba una descripción completamente nueva de la realidad, la cual analizaré con más detalle en el próximo capítulo. De hecho, la teoría de Einstein demuestra una universalidad bastante sorprendente, y aquí solo

mencionaré un aspecto de ella para ilustrar a qué me refiero. El bello edificio matemático que Einstein expuso ante el mundo en 1915 sigue ofreciendo también la mejor teoría actual sobre la naturaleza del espacio y el tiempo, y exhibe una precisión extrema. Además, predice de forma correcta que un campo gravitatorio frenará el devenir del tiempo: cuanto más intenso sea el campo, más lento discurrirá el tiempo. Este efecto conlleva la extraña consecuencia de que el tiempo transcurre ligeramente más despacio en el núcleo de la Tierra (en las profundidades de su pozo gravitatorio) que en la superficie. Esta diferencia temporal, acumulada a lo largo de los 4500 millones de años que tiene nuestro planeta, implica que el núcleo de la Tierra es en realidad dos años y medio más joven que la corteza. Dicho de otra manera, cada sesenta años de la historia de la Tierra, su centro envejece un segundo menos que la corteza. Esta cifra se ha calculado usando la fórmula de la relatividad general, y no resulta nada obvio cómo podríamos proceder para comprobarlo de manera experimental, pero estamos tan seguros de la fórmula que ningún físico duda sobre su veracidad.

Si nos detenemos a pensar en la predicción que acabo de exponer, tal vez nos parezca un tanto paradójica. Al fin y al cabo, si taladráramos el suelo para acceder a su centro, dejaríamos de notar los efectos de la gravedad, puesto que la Tierra tiraría de nosotros por igual en todas direcciones: percibiríamos ingravidez. Sin embargo, el efecto sobre el tiempo no depende de la intensidad de la fuerza gravitatoria que impera en el centro de la Tierra, que vale cero, sino más bien del «potencial» gravitatorio que hay ahí. Este se corresponde con la cantidad de energía necesaria para desplazar un objeto desde esa posición hasta un lugar apartado por completo de la gravedad terrestre. Un físico diría que el núcleo de la Tierra se encuentra en la parte más profunda del pozo de potencial de la Tierra, donde la dilatación del tiempo es mayor.

Incluso podemos medir la diferencia del ritmo al que fluye el tiempo a lo largo de una altura de tan solo unos pocos metros. Un reloj situado en la planta alta de una casa está sometido a un potencial gravitatorio ligeramente más débil (más alejado del núcleo terrestre) que otro que se encuentre en la planta baja, de modo que funciona un poco más rápido. Pero se trata de un efecto

extremadamente insignificante: la sincronización entre ambos relojes se desviará un solo segundo cada cien millones de años.

Si todo esto le infunde cierto escepticismo, permítame asegurarle que el efecto cuantitativo de la gravitación es muy real; si no lo tuviéramos en cuenta para las telecomunicaciones modernas, los teléfonos inteligentes que llevamos en el bolsillo no serían capaces de señalar nuestra ubicación en cualquier lugar con tanta exactitud. La localización del punto del planeta en el que nos encontramos depende de que el teléfono envíe y reciba señales de varios satélites GPS situados en órbita. El tiempo que tardan esas ondas electromagnéticas en cubrir la distancia que separa ambos instrumentos debe conocerse con una precisión de tan solo unas cuantas centésimas de microsegundo (para que nuestra ubicación se pueda señalar con un margen de error de unos pocos metros). Pero el invento no funcionaría si partiéramos del supuesto de que el tiempo transcurre al mismo ritmo en todas partes. De hecho, los relojes atómicos de alta precisión que van a bordo de satélites adelantan unas 40 millonésimas de segundo al día, de modo que hay que obligarlos a funcionar más despacio para que vayan al mismo ritmo que los relojes más lentos situados en la Tierra. Sin este ajuste los relojes de los satélites irían adelantados, y la ubicación por GPS acumularía una desviación de más de diez kilómetros al día, lo que tornaría inútil esa información.

Otro detalle llamativo es que las mismas ecuaciones de la relatividad general que predicen cómo introduce la gravitación alteraciones insignificantes en el ritmo al que funcionan los relojes, también revelan cómo discurren las escalas temporales más largas imaginables, lo que permite trazar la historia del universo a lo largo de miles de millones de años hasta remontarnos a la Gran Explosión, así como predecir su futuro. La teoría de la relatividad de Einstein se aplica por igual a los intervalos de tiempo más cortos y a los más largos.

Pero esta universalidad se acaba ahí. Sabemos que a las escalas más diminutas de la longitud y el tiempo, la física del mundo cotidiano (ya sea la de Newton o la de Einstein) se desmorona, y debe reemplazarse por las predicciones de la mecánica cuántica. De hecho, tal como explicaremos en los próximos capítulos, la propia definición del tiempo según la teoría cuántica difiere enormemente

de la forma en que se introduce en la relatividad general, lo que constituye uno más de los numerosos desafíos a los que se enfrenta la comunidad física al intentar combinar la relatividad y la mecánica cuántica en una sola teoría unificada de gravitación cuántica.

Simetría

La universalidad de las leyes de la naturaleza tiene unos orígenes matemáticos fascinantes y va unida a una de las ideas más poderosas de la ciencia: la simetría. A un nivel rudimentario, todo el mundo sabe qué significa que una figura geométrica sea simétrica. Un cuadrado es simétrico porque si trazamos una línea vertical a través de su centro para dividirlo por la mitad (o si se hace lo mismo con una línea horizontal o diagonal), entonces al intercambiar la posición de ambas mitades la forma no cambia. De igual manera obtenemos el mismo resultado si la rotamos con ángulos múltiplos de 90 grados. Un círculo presenta una simetría aún mayor, porque se puede rotar con cualquier ángulo sin que cambie de aspecto.

En el ámbito de la física, las simetrías pueden revelar algo mucho más profundo sobre la realidad que la mera invariabilidad de ciertas formas al rotarlas o invertirlas. Afirmar que un sistema físico tiene simetría equivale a decir que alguna propiedad del sistema permanece invariable cuando cambia otra. Esto resulta ser un concepto muy útil. Las simetrías «globales» se dan cuando las leyes físicas se mantienen invariables (no cambia la forma en que describen alguna característica del mundo) siempre que algún otro cambio o «transformación» se aplique por igual en todas partes. En 1915 Emmy Noether descubrió que, siempre que observemos esa simetría global en la naturaleza, podemos estar seguros de que lleva asociada una ley de conservación (una cantidad física que se mantiene idéntica). Por ejemplo, el hecho de que las leyes de la física no cambien cuando nos movemos de un lugar a otro arroja la ley de conservación de la cantidad de movimiento (o momento lineal), y el hecho de que las leyes físicas no cambien de un instante temporal al siguiente nos brinda la ley de conservación de la energía.

Esta idea se ha revelado extremadamente útil en física teórica y tiene profundas consecuencias filosóficas. Los físicos siempre están pendientes de localizar simetrías más profundas y menos obvias, ocultas en sus matemáticas. El teorema de Noether dice que no «inventamos» las matemáticas para tener una manera de describir el mundo, sino que, tal como observó Galileo, la naturaleza habla la lengua de las matemáticas, que está «ahí» lista y a la espera de ser descubierta.

La búsqueda de nuevas simetrías también ha ayudado a los físicos en su aspiración de unificar las fuerzas de la naturaleza. Una de esas simetrías matemáticas (que no resulta nada fácil de explicar) es la denominada supersimetría. Aún no sabemos si se trata de una propiedad real de la naturaleza, pero, si lo fuera, podría ayudarnos a resolver algunos misterios, como de qué está hecha la materia oscura y si la teoría de cuerdas es la correcta para construir la gravitación cuántica. El problema es que esta simetría predice la existencia de cierta cantidad de partículas subatómicas que todavía no se han descubierto. Hasta que contemos con una verificación experimental, la supersimetría seguirá siendo una mera idea matemática interesante.

Los físicos también han aprendido mucho (y cosechado un montón de premios Nobel por sus esfuerzos) intentando hallar excepciones a las reglas y las leyes que arrojan esas simetrías, un concepto conocido como «ruptura de la simetría». ¿Alguna vez se ha sentado usted a una mesa redonda en un restaurante o una fiesta elegante y ha olvidado si el platillo para el pan que le corresponde es el que está a su izquierda o a su derecha? Antes de que alguno de los comensales toque algo, la cuidada disposición de los platos, vasos y cubiertos en la mesa es simétrica. Al margen de los códigos de etiqueta, en realidad no tiene ninguna relevancia cuál es el pan que nos corresponde, pero en cuanto alguien realiza su elección y coloca (correctamente) un panecillo en el platillo del pan situado a su izquierda, la simetría perfecta se rompe y todo el mundo podrá seguir la misma pauta.

La ruptura de la simetría ha ayudado a conocer los elementos constitutivos de la materia: las partículas elementales y las fuerzas que actúan entre ellas. El ejemplo más conocido guarda relación con una de las dos clases de fuerzas que actúan en el interior de los

núcleos atómicos, conocida como fuerza nuclear débil. Hasta la década de 1950 se pensaba que las leyes de la física serían exactamente las mismas en una versión especular de nuestro universo. Esta idea (la posibilidad de intercambiar derecha e izquierda) se conoce como «conservación de la paridad» y se da con las otras tres fuerzas de la naturaleza: la gravitación, el electromagnetismo y la fuerza nuclear fuerte. Pero resulta que la fuerza nuclear débil, que es la responsable de que protones y neutrones se transformen unos en otros, rompe esta simetría especular. No arroja exactamente la misma física al intercambiar izquierda y derecha. Este incumplimiento de la simetría especular constituye ahora un ingrediente importante del modelo estándar de la física de partículas.

Reduccionismo

Buena parte de la ciencia moderna se ha construido sobre la idea de que para comprender cualquier propiedad compleja del mundo hay que descomponerla en sus elementos esenciales, como cuando se desmonta un reloj mecánico para ver cómo encajan todos los engranajes y palancas para hacerlo funcionar. Esta concepción de que el todo no es más que la suma de sus partes se conoce como reduccionismo y ha sido crucial en muchas disciplinas científicas hasta la actualidad. Su origen se remonta hasta el filósofo griego Demócrito y su idea del atomismo (que la materia no se puede dividir hasta el infinito, sino que se compone de elementos constitutivos sustanciales). Filósofos posteriores, como Platón y Aristóteles, esgrimieron argumentos en contra del atomismo con el convencimiento de que tiene que haber algo más, algo que ellos contemplaban como «la forma del objeto» y que debía sumarse a la sustancia en sí. Consideremos, por ejemplo, la forma de una estatua. Su significado y su esencia son algo más que la piedra de la que está hecha. Esta vaga noción metafísica no forma parte de la física moderna. Pero reflexionar de este modo sobre las cosas ayuda a emitir argumentos más claros en contra del reduccionismo.

Veamos otro ejemplo: el agua. Podemos estudiar las propiedades de una molécula de H_2O de muchas maneras: la geometría de los enlaces entre los átomos de oxígeno e hidrógeno y las reglas

cuánticas que rigen esos enlaces, la forma en que se unen y organizan las moléculas, etcétera. Pero no habría manera de *deducir* la propiedad de que el agua está «mojada» observando tan solo sus partes constitutivas hasta un nivel molecular. Esta propiedad «emergente» solo se torna manifiesta cuando confluye una masa formada por billones de moléculas de agua.

¿Implica esto entonces que el todo es algo más que la suma de las partes, en el sentido de que hay alguna física adicional que debe incluirse para explicar, por ejemplo, las propiedades de la materia en grandes cantidades? No necesariamente. La idea de la emergencia (que hay cualidades del mundo físico, como el calor o la presión o la humedad del agua, que no tienen equivalentes en la física atómica) no significa que un sistema sea algo más que la suma de sus partes, siempre que esas propiedades emergentes se sigan basando tan solo en conceptos más fundamentales, como las fuerzas electromagnéticas que actúan entre partículas subatómicas en el caso del agua.

El empeño reduccionista prosiguió cuando en el siglo XIX intentamos explicar las propiedades de los sistemas complejos que no podían interpretarse a través de las leyes simples de la mecánica newtoniana. Hacia el final de ese siglo, James Clerk Maxwell y Ludwig Boltzmann desarrollaron dos nuevos subcampos de la física (la termodinámica y la mecánica estadística) que ayudaron a desentrañar los sistemas formados por muchas piezas considerándolos de manera conjunta. (Ahondaremos en estas ramas de la física en el capítulo 6). Por tanto, aunque es cierto que no se puede medir la temperatura o la presión de un gas observando cómo vibran y chocan entre sí sus moléculas individuales, sabemos que la temperatura y la presión se deben tan solo al comportamiento colectivo de esas moléculas individuales. ¿Qué más puede haber?

Si bien esta línea de pensamiento reduccionista y simplista no es errónea (en el sentido de que, en efecto, no hay ningún proceso físico adicional que aparezca por arte de magia en cuanto nos apartamos de la escala molecular), tiene una utilidad limitada para describir las propiedades de un sistema complejo. Lo que necesitamos no es una física «nueva», sino «más» física para conocer y entender cómo emergen ciertas propiedades dentro de un sistema

a partir del comportamiento colectivo de sus elementos constitutivos. El físico galardonado con el Nobel Philip Anderson resumió esta idea en el título de un célebre artículo: «More is different»[13] [«Más es diferente»].

Pero saber que se necesita más física cuando juntamos los elementos constitutivos (las partículas, átomos y moléculas) para formar un montón de materia no es lo mismo que decir que sabemos cuál es la física que falta. Esto se ve con claridad cuando aspiramos a alcanzar una interpretación unificada del universo físico. Todavía somos incapaces de inferir las leyes de la termodinámica a partir del modelo estándar de la física de partículas, por ejemplo; o, de hecho, de lograr lo contrario, puesto que no es nada obvio cuál de esos dos pilares de la física es el más fundamental. Y aún estamos más lejos de entender estructuras más complejas, como aquello que distingue lo vivo de lo inerte. Al fin y al cabo, usted y yo solo estamos formados por átomos, aunque estar vivo es algo más que una mera cuestión de complejidad, ya que un organismo vivo no es más complejo en cuanto a estructura atómica que un organismo idéntico que acaba de morir.

Y, sin embargo…, tal vez podamos soñar con que algún día seremos capaces de tener una sola teoría física unificada en la que basar todos los fenómenos naturales. Hasta entonces baste con decir que una línea de pensamiento reduccionista solo nos ha traído hasta aquí, y que necesitamos aplicar teorías y modelos diferentes dependiendo de lo que intentemos describir.

Los límites de la universalidad

A pesar de la búsqueda de leyes de la física que sean universales, los límites del reduccionismo apuntan a que a veces el mundo se comporta de maneras muy distintas a diferentes escalas, y debe describirse y explicarse usando el modelo o la teoría adecuados. Por ejemplo, a la escala de los planetas, estrellas y galaxias, la gravitación lo domina todo (controla la estructura del cosmos). Sin embargo, no tiene ninguna relevancia perceptible para nosotros a una escala atómica, donde imperan las otras tres fuerzas (el electromagnetismo y las fuerzas nucleares fuerte y débil). De hecho, seguramente el mayor problema sin resolver del mundo de la física

(el cual retomaremos en el capítulo 5) es que las leyes de la física que describen el mundo cotidiano, eso que denominamos el mundo «clásico» hecho de materia, energía, espacio y tiempo, sencillamente no sirven cuando descendemos al mundo de los átomos individuales, donde entran en juego las reglas muy diferentes de la mecánica cuántica.

Incluso a un nivel cuántico suele ser necesario optar por el modelo apropiado que mejor se aplica al sistema que se quiera. Desde comienzos de la década de 1930 sabemos, por ejemplo, que el núcleo atómico se compone de protones y neutrones; pero a finales de la década de 1960 se descubrió que esas partículas no son elementales y que, en realidad, consisten en elementos aún más diminutos y fundamentales: los cuarks. Esto no implicó que los especialistas en física nuclear se vieran obligados a describir las propiedades de los núcleos usando modelos de cuarks. Un enfoque reduccionista simplista defendería la necesidad de hacerlo para llegar a una descripción más profunda y más exacta del núcleo atómico. Pero eso no serviría de mucho en realidad. Se logra una aproximación al problema realmente buena al describir las propiedades de los núcleos atómicos considerando que los protones y neutrones se comportan como entidades compactas sin estructura, y no hace falta describirlos como sistemas compuestos por tres cuarks. Por tanto, aunque sus propiedades y su comportamiento tienen que deberse en última instancia a su estructura más profunda, no es algo evidente ni necesario para entender cualidades como la forma o la estabilidad de un núcleo. De hecho, incluso dentro de la física nuclear en sí se emplean modelos matemáticos muy diferentes porque se aplica el mejor con cada clase de núcleo; no existe una teoría universal de la estructura nuclear.

A esto me refiero al decir que el mundo se comporta de maneras distintas a diferentes escalas de tamaño, duración y energía. Aunque dos de las maravillas de la física son la universalidad de muchas de sus teorías y que permite conocer mejor un sistema al ahondar cada vez más en sus partes y desentrañar cómo se relacionan con el todo, también es verdad que a menudo debemos escoger la teoría más adecuada para la escala que nos interese estudiar. Para instalar una lavadora en casa no es necesario entender los entresijos del modelo estándar de la física de partículas, por mucho que las lavadoras,

como todo lo demás en el mundo, estén formadas en última instancia por cuarks y electrones. Si intentáramos aplicar las teorías más fundamentales sobre la naturaleza cuántica de la realidad a todos los aspectos de la vida cotidiana, no iríamos muy lejos.

Como ya hemos explorado tanto el potencial como las limitaciones de lo que es capaz de desvelar la física (desde el poder de las simetrías matemáticas subyacentes a las leyes físicas hasta la mera escala a la que pueden aplicarse esas leyes o las limitaciones del reduccionismo y la universalidad), ahora estamos listos para entrar en materia. En el próximo capítulo empezaré por el primero de los tres pilares fundamentales de la física: la relatividad de Einstein.

3. El espacio y el tiempo

Un libro tan breve como este no permite abarcar todas las áreas de la física, por muy fascinantes que sean muchas de ellas. Así que he destilado todo lo que se sabe en la actualidad sobre el universo físico para reducirlo a tres pilares primordiales: tres visiones de la realidad desde direcciones muy distintas. El primero de esos pilares, que presentaré en este capítulo y el siguiente, se basa en los trabajos de Albert Einstein de comienzos del siglo XX. Este pilar explica los conocimientos actuales sobre cómo se comportan la materia y la energía dentro del espacio y el tiempo a las escalas más grandes bajo el influjo de la gravitación, unos conocimientos que se engloban dentro de su famosa teoría general de la relatividad.

Para esbozar la cosmovisión einsteiniana hay que partir del propio lienzo. El espacio y el tiempo son los sustratos sobre los que se producen los acontecimientos, pero son conceptos resbaladizos. El sentido común nos dice que el espacio y el tiempo deberían estar ahí desde el principio, que el espacio es donde ocurren los hechos y donde actúan las leyes de la física, mientras que el inexorable paso del tiempo es, bueno, *es* sin más. Pero ¿es correcta la idea del espacio y del tiempo que transmite el sentido común? Una lección importante para quienes nos dedicamos a la física es que no siempre se puede confiar en el sentido común. Al fin y al cabo, el sentido común nos insta a pensar que la Tierra es plana, pero incluso los griegos de la Antigüedad entendieron que su gran tamaño impide apreciar con facilidad su curvatura, aunque podían acometer experimentos sencillos para demostrar que en realidad consiste en una esfera. De manera análoga, la experiencia cotidiana evidencia que la luz tiene las propiedades de una onda y, por tanto, no se puede comportar como si estuviera formada por una corriente de partículas individuales. Si así fuera, ¿cómo explicaríamos los patrones de interferencia? Y, sin embargo, se ha demostrado más

allá de toda duda a través de experimentos concienzudos que los sentidos nos engañan acerca de la naturaleza de la luz. Y en relación con el mundo cuántico hay que olvidar muchas nociones cotidianas basadas en la mera intuición para entender de verdad lo que sucede.

Aprender a no confiar siempre en los sentidos es una cualidad valiosa que la física ha heredado de la filosofía. Ya en 1641 René Descartes defendió en sus *Meditaciones metafísicas* que para conocer la verdad sobre el mundo material, que es absolutamente cierto, lo primero que debía hacer era dudar de todo, a menudo a pesar de lo que le dijeran los sentidos. Esto no significa que no podamos creer lo que se nos dice o se nos muestra, sino que, según Descartes, para considerar reales los objetos materiales «se precisa una mente libre por completo de todo prejuicio y capaz de desligarse con facilidad del mundo de los sentidos» **[14]**.

De hecho, incluso mucho antes de que Descartes se planteara esta cuestión, el estudioso medieval Alhacén había iniciado un movimiento filosófico a comienzos del siglo XI conocido en lengua árabe como *al-Shukuk* («Las dudas»), y escribió extensamente, sobre todo en relación con la mecánica celeste de los griegos, acerca del deber de cuestionar los conocimientos del pasado y no aceptar lo que nos digan sin tener pruebas de ello. Esta es la razón por la que la física ha sido siempre una ciencia empírica basada en el método científico de comprobar cada hipótesis y teoría a través de la experimentación.

Aun así, algunos de los logros más destacados de la física han llegado a partir de conclusiones lógicas derivadas no de experimentos u observaciones reales, sino de «experimentos mentales» consistentes en plantear ciertas hipótesis e inventar un experimento imaginario para entender sus consecuencias. Dicho experimento podrá o no llevarse a la práctica, pero siempre ofrece una herramienta valiosa para conocer el mundo a través del mero poder de la lógica y del razonamiento. Algunos de los experimentos mentales más célebres fueron idea de Einstein y le sirvieron para desarrollar las teorías de la relatividad. Una vez concluidas por completo estas teorías, por supuesto pudieron comprobarse mediante experimentos de laboratorio reales.

No es de extrañar que tengamos dificultades para interpretar el

espacio y el tiempo, puesto que estamos dentro de ellos y cuesta liberar la mente de sus fronteras para «ver» la realidad desde fuera. Sin embargo, por increíble que parezca, es posible hacerlo. En este capítulo esbozaré lo que se sabe hoy en día sobre la naturaleza del espacio y el tiempo en un homenaje a todo lo que le debemos a Einstein y a sus dos hermosas teorías de la relatividad.

¿Cómo se definen en física el espacio y el tiempo?

Un rasgo importante de la física newtoniana es que el espacio y el tiempo tienen una existencia real independiente de la materia y de la energía que alberguen en su interior. Pero filósofos de todo el mundo contemplaron esta idea mucho antes que Newton. Por ejemplo, Aristóteles creía que el espacio vacío no existe de por sí, que sin materia no puede haber espacio. Mucho después, Descartes defendió que el espacio no es más que la distancia (o «la extensión») que hay entre los objetos. Según estos dos grandes pensadores, el espacio que hay dentro de una caja vacía solo existe debido a los confines de la caja: si se eliminan las paredes, el volumen que había en su interior pierde todo el sentido.

Analicemos un poco este ejemplo. ¿Y si después descubro que la caja estaba dentro del espacio vacío de un cofre mayor? ¿Sigue existiendo el espacio que había dentro de la caja pequeña tras eliminar sus paredes, ahora que forma parte del volumen del cofre más grande? Y entonces ¿era algo real en todo momento? Imagine ahora que la caja pequeña que está vacía (donde *vacía* significa totalmente libre de cualquier cosa: un vacío) se *mueve* dentro de un vacío contenido en el interior del cofre más grande. ¿Es el espacio vacío en el interior de la caja pequeña el mismo espacio vacío a medida que la caja se mueve, u ocupa partes diferentes del espacio que hay dentro del cofre mayor? La respuesta es sencilla si sustituimos por agua el «espacio vacío» que hay dentro de la caja pequeña y estanca. Siempre que la caja pequeña se mueva dentro de un volumen mayor de agua, podemos admitir que conserva las mismas moléculas de agua en su interior mientras se desplaza por el agua que hay fuera al moverse. Pero ¿y si no hay agua? ¿Y qué sucede si eliminamos las paredes físicas de ambas cajas y todo lo

demás de este universo imaginario, de tal forma que lo único que quede sea la nada? ¿Sigue siendo algo esa nada? ¿Está disponible ese espacio vacío para llenarlo de materia o para quedar contenido en los confines de una caja? Tal vez esté planteando el mismo interrogante de distintas maneras, pero eso es porque no se trata de una pregunta trivial en absoluto.

Isaac Newton creía que el espacio tiene que existir para que pueda haber materia y energía en su interior y para que se produzcan acontecimientos en él. Pero el espacio existe, afirmaba, tan solo como una nada vacía, con independencia de las leyes físicas que rigen el comportamiento de la materia y la energía en su interior. Para Newton el espacio es el lienzo sobre el que se plasma la realidad, porque sin espacio (y, por supuesto, sin tiempo) donde situar acontecimientos, ¿cómo íbamos a asignar coordenadas para ubicar los sucesos? Es indudable que deben ocurrir en «algún punto» espacial y en «algún instante» temporal. Si no hay un espacio y un tiempo absolutos, ¿cómo aspirar a anclar la realidad?

Pero ¿estaba Newton en lo cierto? La respuesta que podemos dar hoy en día es afirmativa y negativa. (Lo siento). Atinó en que el espacio es real (es algo más que meros huecos entre los objetos, tal como había defendido Descartes). Pero se equivocaba al considerar que el espacio tiene una existencia absoluta, *independiente* de lo que contiene.

Estas dos afirmaciones suenan contradictorias hasta que se conoce la relatividad de Einstein. Einstein demostró que el espacio y el tiempo absolutos no existen como entidades separadas. Pero para entender por qué es necesaria esta concepción debemos adentrarnos en la primera de sus dos teorías de la relatividad.

La teoría especial de Einstein

Hasta que Isaac Newton completó su trabajo sobre las leyes del movimiento, los debates sobre la naturaleza del tiempo se situaban en el ámbito de la filosofía y de la metafísica, y no en el de la verdadera ciencia. Newton describió cómo se mueven y cómo se comportan los objetos bajo el influjo de fuerzas y, como todo movimiento o cambio requiere un tiempo para tener sentido, este debía incluirse como parte fundamental de su descripción

matemática del mundo. Pero el tiempo newtoniano es absoluto e inexorable; fluye a un ritmo constante, como si hubiera un reloj cósmico imaginario marcando los segundos, las horas, los días y los años al margen de los sucesos y procesos que acaecen en el espacio. En 1905 llegó Einstein y puso patas arriba el universo newtoniano al revelar que el tiempo mantiene una conexión profunda con el espacio.

La conclusión de Einstein fue que el tiempo no es absoluto: no transcurre al mismo ritmo para todo el mundo. Si yo contemplo dos sucesos simultáneos (pongamos, por ejemplo, dos haces de luz procedentes de fuentes situadas a cada uno de mis costados) mientras otra persona está en movimiento y me adelanta en ese mismo momento, esta no verá que ocurren al mismo tiempo, sino uno ligeramente después del otro. Esto es así porque el ritmo al que transcurre el tiempo para cada uno de nosotros depende del movimiento relativo de cada cual con respecto de los demás. Esta extraña noción es una de las primeras lecciones de la teoría de la relatividad y se conoce como la relatividad de la simultaneidad. Pero retrocedamos un poco para observar estos conceptos con más detenimiento.

Pensemos en cómo viajan las ondas sonoras hasta el oído. En realidad el sonido no es más que la vibración que experimentan las moléculas del aire al cederse energía cuando chocan entre sí. Si no hubiera materia (aire), no habría sonido. En el espacio nadie puede oír tus gritos, tal como decía el reclamo de la película *Alien* en la década de 1980.

La gran idea de Einstein fue proponer que, a diferencia de las ondas de sonido, las ondas de luz no necesitan un medio en el que propagarse. Su teoría se basaba en dos ideas (conocidas como los principios de la relatividad). La primera, procedente de Galileo, sostiene que todo movimiento es relativo y que no hay ningún experimento que permita demostrar que alguien o algo está realmente en reposo. El segundo principio establece que las ondas lumínicas viajan a una velocidad que es independiente de la velocidad con la que se mueva la fuente de luz. Estas dos ideas parecen razonables hasta que se profundiza un tanto en sus implicaciones. Consideremos en primer lugar la segunda de ellas (que la luz se mueve con la misma velocidad para todo el mundo) y

realicemos un experimento mental sencillo.

Imagine que un coche se nos acerca despacio por una carretera vacía. Las ondas del sonido del motor llegarán hasta nosotros antes que el coche, ya que viajan más rápido, pero su velocidad dependerá de la rapidez con que puedan transmitirlas las moléculas del aire en vibración; no nos llegarán antes porque el coche acelere su marcha. Lo que ocurrirá en ese caso será que se comprimirán en longitudes de onda más cortas. Es lo que se conoce como efecto Doppler y que reconocemos como un cambio de tono en el sonido del coche cuando al fin nos alcanza y pasa de largo. A medida que se aleja, las ondas de sonido se emiten desde una distancia cada vez mayor y, por tanto, nos llegan estiradas en longitudes de onda más largas, de ahí que el tono sea más bajo. De modo que, aunque la *longitud de onda* de las ondas de sonido depende de la velocidad de la fuente emisora, la *velocidad* de las ondas en sí con respecto a nosotros (cuánto tardan en llegarnos) no cambia a menos que empecemos a movernos por el aire hacia el coche que se acerca. Hasta aquí todo bien, espero.

La luz es diferente. No necesita un medio por el que viajar y con respecto al cual medir su velocidad. Esto significa que no hay ninguna posición privilegiada en la que podamos afirmar que estamos realmente en reposo y, por tanto, que permita medir de manera fiable la «verdadera» velocidad de la luz. A partir de ahí Einstein llegó a la conclusión de que todos deberíamos medir la misma velocidad de la luz con independencia de lo rápido que nos movamos en relación con los demás. (Es decir, siempre que no experimentemos ninguna aceleración o desaceleración mientras medimos la velocidad de la luz situada a cierta distancia de nosotros[15]).

Consideremos ahora dos cohetes que se acercan entre sí a una velocidad constante cercana a la de la luz, aunque no tienen ningún punto de referencia que permita decir quién se mueve, o no, con respecto a quién. Un astronauta a bordo de un cohete envía un pulso de luz hacia el segundo cohete que se acerca y mide la velocidad del pulso a medida que se aleja de sí. Como tiene toda la legitimidad para afirmar que está en reposo, flotando en el espacio vacío, mientras que es el otro cohete el que realiza todo el movimiento, debería ver que la luz se aleja de sí mismo a la

velocidad habitual de algo más de mil millones de kilómetros por hora[16] y, en efecto, eso es lo que observa. Pero al mismo tiempo, la astronauta del segundo cohete también tendrá legitimidad para afirmar que es ella quien permanece quieta suspendida en el espacio. De modo que ella también espera que la velocidad de la luz que avanza hacia ella ascienda a poco más de mil millones de kilómetros por hora (ya que, igual que ocurría con las ondas sónicas del coche, la velocidad de la luz no debería depender de la velocidad a la que la fuente de luz se acerca a ella). Y, en efecto, esa será la velocidad que medirá en la luz. Por tanto, parecería que desde ambas naves se mide que el mismo pulso de luz viaja a la misma velocidad ¡a pesar de que se desplazan la una hacia la otra con una velocidad cercana a la de la luz!

La extraña naturaleza de la luz resulta ser una propiedad de la velocidad a la que es capaz de viajar y no de la luz en sí (una velocidad que es la máxima posible en nuestro universo y que entreteje el espacio y el tiempo juntos en una misma trama). Porque la única manera de que la luz pueda viajar a la misma velocidad para todos los observadores, con independencia de lo rápido que estos se estén moviendo en relación con los demás consiste en que cambie nuestra noción de la distancia y el tiempo.

Veamos otro ejemplo. Imagine que usted envía desde la Tierra una serie de pulsos, o destellos, de luz detrás de una amiga que partió hacia el espacio a bordo de un cohete muy veloz (uno futurista y muy potente capaz de viajar al 99 % de la velocidad de la luz). Desde su posición, usted medirá que los pulsos de luz se alejan a mil millones de kilómetros por hora, de modo que rebasan despacio el cohete de su amiga, a tan solo el 1 % de la velocidad de la luz respecto de ella (de la misma manera que un coche que circule por el carril rápido de una autopista un poco más deprisa que otro vehículo que vaya por el carril lento lo rebasará con una velocidad relativa equivalente a la diferencia entre las velocidades de ambos). Pero ¿qué observará su amiga desde el cohete cuando los pulsos de luz la adelanten? La teoría de la relatividad dice que verá que la sobrepasan a mil millones de kilómetros por hora. Recuerde, la velocidad de la luz es constante, y todos los observadores perciben que viaja a la misma velocidad.

La única forma de que esto tenga sentido consiste en que el

tiempo a bordo del cohete transcurra a un ritmo más lento que en la Tierra. De este modo, lo que usted ve desde aquí como un pulso de luz que rebasa despacio la ventana del cohete será percibido por su amiga como un pulso de luz que pasa como un relámpago porque habrá transcurrido muy poco tiempo en su reloj, que funciona más lento dentro del cohete (aunque a su amiga le parezca que el reloj de a bordo marcha a un ritmo normal). Por tanto, una de las consecuencias de que todos los observadores vean que la luz se mueve a la misma velocidad es que todos medimos distancias y tiempos de maneras diferentes. Y lo cierto es que esto es lo que vemos: la constancia de la velocidad de la luz para todos los observadores es un hecho que se ha comprobado de forma experimental una y otra vez, y sin el cual el mundo en que vivimos no tendría ninguna lógica.

La teoría especial de la relatividad resuelve con gran elegancia esta situación contraria a la intuición combinando el tiempo y el espacio para que resulte algo en lo que todos estemos de acuerdo. Imagine que todo el espacio se encuentra dentro de una caja rectangular tridimensional inmensa. Para definir un acontecimiento que tiene lugar dentro de la caja le asignamos unas coordenadas x, y y z (para indicar su posición en los tres ejes de la caja) junto con un valor temporal (en qué instante ocurrió). El sentido común nos diría que el valor temporal es muy diferente de los otros tres que definen la ubicación del acontecimiento dentro del espacio. Pero ¿y si pudiéramos añadir un eje temporal a los tres ejes espaciales? Tendría que consistir en una «dirección» situada en ángulo recto con respecto a cada uno de los tres ejes espaciales, lo cual nos resulta imposible de visualizar. Esto daría como resultado un volumen tetradimensional de espacio *más* tiempo.

Una simplificación obvia que ayuda a concebirlo consiste en sacrificar una de las dimensiones espaciales y reducir nuestro volumen tridimensional a una superficie bidimensional, lo que permitiría usar la tercera dimensión que hemos liberado como eje para el tiempo. Imagine ahora este bloque estático de espacio y tiempo como una barra gigante de pan cortada en rebanadas, donde el eje del tiempo discurre a lo largo de la longitud de la barra. Cada rebanada de pan es una instantánea de todo el espacio en un solo momento temporal, mientras que las rebanadas se corresponden

con instantes sucesivos. Esto se conoce en física como el modelo del universo de bloque. Aunque solo es tridimensional (dos dimensiones espaciales y una temporal), no debemos olvidar que en realidad representa un constructo de cuatro dimensiones: un espacio-tiempo tetradimensional. Desde un punto de vista matemático no hay ningún problema para manejarse con cuatro dimensiones; lo único que no es posible es su representación.

Si observáramos el espacio-tiempo tetradimensional desde fuera, experimentaríamos la totalidad de la existencia, no solo todos los espacios, sino también todos los tiempos (pasado, presente y futuro) coexistiendo y congelados. Es una visión imposible, una visión omnisciente, porque en realidad siempre estamos atrapados dentro del universo de bloque y experimentamos el paso del tiempo como un devenir constante a lo largo del eje del tiempo, moviéndonos despacio de una rebanada de pan a la siguiente, cual escenas de una película apiladas unas sobre otras, en lugar de unidas entre sí por los extremos formando una cinta. El concepto del universo de bloque es muy útil porque permite entender las distintas perspectivas que se tienen de acuerdo con la teoría de la relatividad. Dos observadores que se mueven a una velocidad elevada uno en relación con el otro pueden captar dos acontecimientos (digamos, destellos de luz), pero no percibirán del mismo modo la distancia a la que se encuentran o el intervalo de tiempo que los separa. Es el precio que tenemos que pagar para que todos veamos que la luz se mueve a la misma velocidad. Desde el interior del universo de bloque tetradimensional, las distancias espaciales y los intervalos temporales se pueden combinar, de tal modo que la separación entre dos acontecimientos, lo que se denomina el intervalo espaciotemporal, será la misma para todos los observadores. Sus discrepancias sobre distancias y tiempos, si se tratan por separado, resultan no ser más que perspectivas distintas dentro del espacio-tiempo. Usted y yo podemos contemplar un cubo desde ángulos diferentes, de tal forma que lo que yo interprete como la profundidad (la distancia medida a lo largo de mi línea de visión) no le parezca lo mismo a usted si lo mira de frente. Dependerá del ángulo desde el que se observa. Pero estaremos de acuerdo en que es un cubo con todos sus lados iguales y en que cualquier diferencia se deberá tan solo a que tenemos perspectivas

distintas. Lo mismo sucede en el universo de bloque tetradimensional. Siempre estaremos de acuerdo en cuanto a los intervalos de espacio-tiempo entre sucesos.

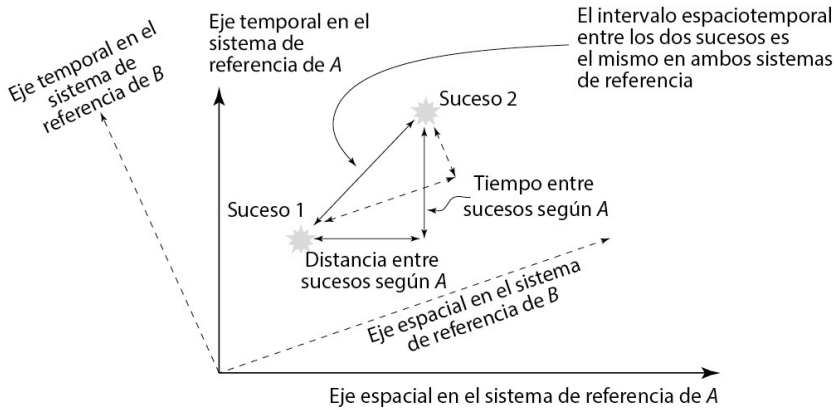

Figura 1. Sucesos en el espacio-tiempo: Si dos observadores A y B que se mueven con una velocidad elevada uno en relación al otro ven dos acontecimientos (haces de luz) que están separados tanto en el espacio como en el tiempo, no percibirán la misma distancia entre ambos sucesos ni la misma duración temporal entre ellos. Esto se debe a que sus ejes para el espacio y el tiempo son diferentes. Pero en el espacio-tiempo tetradimensional (aquí se han obviado dos dimensiones espaciales para simplificar) el intervalo (espaciotemporal) entre los dos sucesos es el mismo en ambos sistemas de referencia: los dos triángulos rectángulos tienen la misma hipotenusa, aunque cada uno tenga una distancia espacial y una distancia temporal diferentes.

La relatividad de Einstein nos enseña que vemos las cosas desde el interior del espacio-tiempo tetradimensional, donde las distancias tanto espaciales como temporales no son más que una cuestión de perspectiva. Ningún observador tiene potestad para afirmar que su perspectiva del espacio y el tiempo es más correcta que cualquier otra, porque todos coincidiremos en cuanto se combinen el espacio y el tiempo. Todas las perspectivas individuales del espacio y el tiempo por separado son relativas, pero, al combinar ambos, el espacio-tiempo resulta absoluto.

Teoría general de Einstein

Del mismo modo que la teoría especial fusiona el espacio con el tiempo, la teoría general de la relatividad de Einstein enlaza el espacio-tiempo con la materia y la energía (las cuales trataré en el próximo capítulo) para ofrecer una explicación más detallada del concepto de gravitación que la de Newton. Según Newton, la gravitación es una fuerza de atracción: una cinta de goma invisible entre masas que las junta entre sí y que actúa de forma instantánea entre ellas con independencia de lo separadas que se encuentren. Einstein brinda una explicación más completa y exacta: que la intensidad del tirón gravitatorio que experimenta un objeto es una medida de la curvatura del espacio-tiempo que lo circunda. Una vez más, esta curvatura no es algo que podamos visualizar. Es imposible imaginar un espacio-tiempo tetradimensional plano, no digamos ya uno curvo. Para casi todos los efectos cotidianos, la descripción de la gravitación de Newton como una fuerza ofrece una aproximación bastante buena a la realidad, pero sus deficiencias se tornan patentes a medida que la intensidad gravitatoria se incrementa, como cuando nos acercamos a un agujero negro o cuando hay que medir distancias y tiempos con mucha precisión, como a bordo de los satélites GPS. En estos casos, nos vemos obligados a abandonar la descripción newtoniana y a adoptar por completo la visión einsteiniana del espacio-tiempo curvo.

Como la gravedad viene definida por la curvatura del espacio-tiempo, esto significa que influye en el transcurrir del tiempo y en la forma del espacio. Para nosotros, que estamos inmersos en el espacio-tiempo, este efecto se manifiesta como una lentificación del tiempo, de forma análoga a lo que vemos cuando los objetos se mueven con una velocidad cercana a la de la luz. Cuanto más intensa sea la gravedad, más despacio marchará el reloj comparado con otro situado lejos de la fuente de ese campo gravitatorio, en una región «más plana» del espacio-tiempo.

Por desgracia para quienes prefieren las ideas complejas explicadas en un lenguaje sencillo y no a través de densas matemáticas, la mayoría de las tentativas por parte de especialistas para describir cómo y por qué el tiempo fluye más despacio en presencia de una gravedad intensa no logran ni explicar el

fenómeno de manera correcta ni explicarlo en absoluto. Pero yo lo voy a intentar.

Del mismo modo que, según la relatividad especial, dos personas en movimiento medirán que el reloj de la otra funciona a un ritmo más lento, entre dos observadores se da una situación similar si se encuentran a una distancia fija entre sí, pero uno de ellos experimenta un empuje gravitatorio más intenso que el otro (por ejemplo, si uno está en la superficie terrestre mientras que el otro se encuentra lejos, flotando en el espacio). También en este caso ambos percibirán diferente el intervalo temporal transcurrido entre dos sucesos. Igual que antes, sus relojes marchan a ritmos distintos: el reloj del observador situado en la Tierra y, por tanto, más próximo al pozo gravitatorio terrestre, donde hay más curvatura espaciotemporal, funcionará más despacio. Sin embargo, a diferencia de lo que ocurría en la relatividad especial, la situación aquí deja de ser simétrica, puesto que esta persona percibirá que el reloj situado en el espacio marca el tiempo más deprisa. En un sentido muy real la gravitación frena el transcurso del tiempo. También cabría decir que los objetos «caen» hacia la Tierra porque siempre se mueven hacia donde el tiempo discurre más lento: procuran envejecer más despacio. ¿No es precioso?

Hasta aquí, pues, el efecto que ejerce la gravitación sobre el tiempo. Pero ¿qué hay del espacio? ¿Qué nos dice la relatividad general sobre él, aparte de la afirmación poco útil de que la gravitación «curva el espacio»? ¿Recuerda usted que tanto Aristóteles como Descartes defendían que, si no hay materia con la que llenarlo, el espacio no tiene una existencia independiente? Pues bien, Einstein llevó esta idea un poco más allá. De acuerdo con su teoría general de la relatividad, la materia y la energía crean un campo gravitatorio, y el espacio-tiempo no es más que la «cualidad estructural» de ese campo. Sin la «materia» contenida dentro del espacio-tiempo no hay campo gravitatorio y, por tanto, ¡ni espacio ni tiempo!

Tal vez suene un poco filosófico, y sospecho que esto incomoda incluso a algunos físicos. El problema se debe en parte a la forma en que se enseña la física. Solemos partir de la relatividad especial y del espacio-tiempo «plano» (porque es más fácil de explicar y porque Einstein desarrolló esta teoría en primer lugar), y luego

continuamos con la relatividad general, más compleja, donde este espacio-tiempo plano se llena de materia y energía que lo curvan. En realidad, desde un punto de vista conceptual deberíamos plantearlo al revés, y empezar por la materia y la energía inmersas en el espacio-tiempo. De este modo la relatividad especial queda reducida a una aproximación idealizada que solo funciona cuando impera una gravedad tan débil que el espacio-tiempo se puede considerar «plano».

La cuestión que quisiera señalar es sutil, y podemos consolarnos pensando que ni tan siquiera el propio Einstein apreció todas sus implicaciones en un primer momento. Dos años después de concluir la teoría general escribió un libro de divulgación científica (o manual popular, tal como él lo denominó) titulado *Sobre la teoría de la relatividad especial y general* y publicado por primera vez en alemán en 1916. A lo largo de las cuatro décadas siguientes de su vida, a medida que iba entendiendo mejor lo que le revelaban las matemáticas sobre el universo, fue añadiendo apéndices a este opúsculo. En 1954, el año anterior a su fallecimiento, escribió el quinto y último apéndice: dos docenas de páginas en prosa con algunas de las ideas más trascendentales generadas jamás por una mente humana.

Para acceder al pensamiento de Einstein es necesario comprender el concepto de «*campo*» en física. La definición más simple de campo es que se trata de una región del espacio con alguna forma de energía o de influjo donde a cada punto se le puede asignar un valor para describir la naturaleza del campo en ese punto. Piense en el campo magnético que hay alrededor de un imán en forma de barra. El campo es más intenso cerca de los polos del imán y se debilita a medida que nos alejamos del mismo. El patrón que adoptan las limaduras de hierro siguiendo las líneas del campo magnético no es más que su manera de reaccionar al campo en el que están inmersas. Pero la cuestión que me gustaría puntualizar parece demasiado obvia para explicarla: *el campo magnético necesita un espacio en el que existir*.

Sin embargo, en gran contraste con lo anterior, el campo gravitatorio descrito por Einstein y creado por la mera existencia de la materia no es tan solo una región de influencia situada *dentro* del espacio y el tiempo, sino que *es* espacio-tiempo. Einstein dedicó

grandes esfuerzos en el apéndice 5 de su «manual» para aclarar su idea sobre esto. En el nuevo prefacio para la edición de 1954 señala:

> [El] espacio-tiempo no tiene por qué ser algo a lo que podamos atribuir una existencia separada, independiente de los objetos reales de la realidad física. Los objetos físicos no se encuentran en el espacio, sino que tienen una extensión espacial. De este modo, el concepto de *espacio vacío* pierde su significado.

Después, en el apéndice 5, explica mejor esta idea:

> Si imaginamos que eliminamos el campo gravitatorio no quedará un espacio de tipo (1) [es decir, un espacio-tiempo plano], sino la nada más absoluta.
> […]
> El espacio-tiempo plano desde el punto de vista de la teoría general de la relatividad no es un espacio sin campo, sino un caso especial… que en sí mismo no tiene ninguna relevancia objetiva… No existe nada parecido al espacio vacío, es decir, un espacio sin campo.

Y concluye:

> El espacio-tiempo no tiene existencia por sí mismo, sino únicamente como cualidad estructural del campo.

A partir de las ideas de Aristóteles y Descartes, Einstein generalizó la idea de que el espacio no existe si no hay objetos materiales y evidenció que el espacio-tiempo no existe si no hay campo gravitatorio.

Al igual que el campo magnético de antes, el campo gravitatorio es una realidad física: puede doblarse, estirarse y ondular. Pero también es algo más fundamental que el campo electromagnético: el campo electromagnético necesita de la existencia del campo gravitatorio, porque sin un campo gravitatorio no hay espacio-tiempo.

La expansión del espacio

Quisiera hacer una última puntualización antes de seguir. Una confusión habitual en mucha gente es pensar que la curvatura del espacio-tiempo se evidencia en la expansión del universo. Si el espacio-tiempo es un gran bloque tetradimensional estático, ¿qué significa entonces que en física afirmemos que se está expandiendo? ¿Cómo puede expandirse algo que lleva el tiempo incrustado en su interior? Al fin y al cabo, el término *expansión* sugiere la idea de que algo cambia con el tiempo, ¡pero ese algo ya *contiene* el tiempo! La respuesta es que la expansión del espacio observada a través de los telescopios no implica ningún estiramiento de la coordenada temporal. Lo que se estira no es el espacio-tiempo, sino que tan solo se expanden las tres dimensiones espaciales a medida que el tiempo avanza. Aunque el espacio-tiempo sea de alguna manera democrático, porque el tiempo no es más que una de sus cuatro dimensiones, la manipulación algebraica de las ecuaciones de la relatividad general (con lo cual me refiero a su reformulación de una forma ligeramente distinta) permite multiplicar todas las distancias por un «factor de escala» que vaya en aumento a medida que el tiempo avance y solo se expanda el espacio.

Recuerde además que esta expansión ocurre tan solo en los vastos huecos que hay *entre* las galaxias, porque dentro de ellas el campo gravitatorio que las mantiene cohesionadas es lo bastante intenso como para contrarrestar la expansión cósmica global. Las galaxias son como pasas incrustadas en la hogaza de pan que se cuece en el horno. La masa se expande, pero las pasas conservan su tamaño, y lo único que ocurre es que se separan cada vez más unas de otras.

En términos del universo de bloque, imagine que el espacio-tiempo local se encuentra inmerso en un «universo de pan» donde cada rebanada sucesiva aumenta a medida que nos desplazamos a lo largo del eje temporal desde el pasado hacia el futuro. Si flotáramos fuera del espacio-tiempo, solo veríamos la barra de pan estática formada por rebanadas cada vez más grandes. Pero desde la posición que ocupamos en el interior del pan (o en una pasa metafórica dentro de la barra), lo único que alcanzamos a percibir es que las rebanadas son cada vez más grandes, de modo que vemos que un punto (por ejemplo, una galaxia) se aleja de nosotros a medida que nos desplazamos por las rebanadas.

A pesar de estos conceptos complejos, todo lo que he descrito en este capítulo sobre el espacio-tiempo procede tan solo de uno de los tres pilares de la física moderna. Pero el espacio, según la teoría de la relatividad, es uniforme y continuo. Si activamos el *zoom* para acceder a objetos cada vez más pequeños, acabamos llegando al terreno del segundo pilar de la física moderna, la mecánica cuántica, donde todo está confuso y sujeto al azar y la incertidumbre. ¿Qué ocurre entonces con el espacio y el tiempo a las escalas de longitud más diminutas y los intervalos temporales más breves? ¿Se vuelve granulado el mismísimo espacio-tiempo, cual píxeles de una imagen ampliada más allá de su límite de resolución? Tal vez. Pronto lo veremos.

El universo de bloque de la relatividad también dice que podemos concebir el tiempo como estático e invariable, donde el pasado, el presente y el futuro coexisten como parte del espacio-tiempo tetradimensional. Pero el tercer pilar de la física, la termodinámica, nos dice que es inadecuado considerar el tiempo como «una dimensión más». La termodinámica describe cómo cambian los sistemas con el tiempo; es más, otorga una direccionalidad al tiempo que no aparece en las tres dimensiones del espacio. Con independencia de si percibimos o no que el tiempo fluye en un sentido único (debido al hecho de que recordamos el pasado, vivimos en el presente y anticipamos el futuro), existe una flecha del tiempo que apunta desde el pasado hacia el futuro y que arruina la simetría perfecta del universo de bloque.

Pero aún no estamos listos para adentrarnos en los otros dos pilares de la física. Antes debemos llenar con algo el espacio-tiempo: con materia y energía. La enseñanza de Einstein es que la materia, la energía, el espacio y el tiempo son compañeros inseparables. Analizaremos qué significa esto en el próximo capítulo.

4. La materia y la energía

La teoría general de la relatividad se encuentra encapsulada desde un punto de vista matemático en lo que se conoce como la ecuación de campo de Einstein (que en realidad consiste en una serie de ecuaciones que se pueden escribir y compactar juntas en una sola línea). Pero las ecuaciones siempre tienen dos términos separados por un signo de igualdad (=), y la forma del espacio-tiempo solo constituye una mitad de esa ecuación. Ahora me gustaría profundizar en la otra mitad.

La ecuación de Einstein expresa de qué manera la materia y la energía determinan el campo gravitatorio, o más bien, la forma del espacio-tiempo. A menudo se dice que su ecuación de campo evidencia cómo se curva el espacio-tiempo debido a la materia y la energía y, al mismo tiempo, cómo se comportan la materia y la energía en el espacio-tiempo curvo. La cuestión es que, igual que la materia y la energía no pueden existir sin un lugar *en* el que estar, tampoco habría espacio-tiempo sin materia ni energía. De modo que analicemos lo que sabemos sobre lo que «llena» el universo.

Energía

La energía es uno de esos conceptos que todos creemos entender de manera intuitiva. Por ejemplo, decimos que estamos «sin energía» cuando sentimos hambre, cansancio o alguna indisposición, mientras que, por el contrario, cuando nos encontramos en forma y bien, nos sentimos «con energía» para acudir al gimnasio. En ocasiones la palabra se emplea en unos términos muy poco científicos en expresiones como «percibo la energía positiva de esta habitación» o «despides mucha energía negativa en este momento». En física, el concepto de energía indica la *capacidad para realizar*

un trabajo; por tanto, cuanta más energía, más capacidad hay para realizar algo, ya sea mover materia de un lugar a otro, calentarla o sencillamente guardar la energía para su uso posterior. La noción de energía se ha usado con profusión dentro de la física a lo largo de un par de siglos, desde que se descubrió que era un concepto más útil que la noción, más tangible, de fuerza, puesto que percibimos las fuerzas, pero no siempre notamos de forma directa la energía si no es en forma de calor o de luz.

Aun así, la definición de «energía» como la capacidad para realizar un trabajo la conecta con la idea de una fuerza, porque cuando se usa el término trabajo en física, solemos referirnos a la capacidad para mover algo en contra de una fuerza de resistencia. Por ejemplo, hace falta energía para arrastrar un mueble pesado por el suelo en contra de la fuerza de rozamiento, o para levantar algo por encima de la cabeza en contra del empuje de la gravedad. De manera similar, una batería gasta energía para impulsar una corriente eléctrica a través de un circuito en contra de la resistencia de un conductor, y la energía calorífica almacenada en el vapor genera presión para propulsar turbinas que transforman esta energía en electricidad, la cual se puede usar a su vez para producir trabajo mecánico o de nuevo luz y calor.

Hay muchos tipos de energía: un objeto en movimiento tiene energía cinética; un cuerpo situado dentro de un campo gravitatorio lleva energía potencial almacenada, y un objeto caliente posee energía térmica debido al movimiento de sus átomos. Pero por muy correcto que sea todo esto, no da en el clavo de lo que es la energía en realidad.

Empecemos por la «ley de la conservación de la energía», la cual establece que la cantidad total de energía que alberga el universo es constante. Esto deriva, a través del teorema de Noether, de una idea más profunda sobre la simetría del tiempo: que todas las leyes de la física son «invariables a la traslación temporal», lo que conduce a que la energía total de un proceso físico se conserva a lo largo del tiempo. Esto ha dado lugar a nuevas consideraciones sustanciales, como la predicción de partículas elementales desconocidas hasta ahora. La conservación de la energía también dice que los móviles perpetuos son imposibles, puesto que no se puede extraer energía continua de la nada.

A la vista de todo ello tal vez piense usted que ahí se acaba todo: la cantidad total de energía que hay en un sistema (en realidad, en el conjunto del universo) siempre se conserva, aunque cambie de una forma a otra. Pero falta un aspecto más profundo de la naturaleza de la energía que aún no he mencionado. En un sentido bastante laxo podría dividirse en dos clases: la energía útil y la energía residual, una distinción con graves consecuencias asociadas a la flecha del tiempo. Sabemos que necesitamos energía para que nuestro mundo funcione, para propulsar los medios de transporte y las industrias, para generar la electricidad que empleamos para alumbrar y calentar los hogares, para que funcionen los electrodomésticos y para alimentar todos nuestros dispositivos electrónicos. En realidad, la energía es indispensable sencillamente para impulsar la mismísima vida.

Es indudable que esto no puede durar para siempre. Entonces, ¿agotaremos algún día toda la energía útil? Si ampliamos la perspectiva, podemos considerar todo el universo como un reloj mecánico cuya cuerda se va agotando despacio. Pero ¿cómo puede ocurrir esto si la energía siempre se conserva? ¿Por qué no puede circular la energía indefinidamente cambiando de una forma a otra, pero estando siempre ahí? La respuesta resulta estar en un cálculo sencillo de estadísticas y probabilidades, y en lo que se conoce como la segunda ley de la termodinámica. Pero, si me lo permite, dejaré esta cuestión para el capítulo 6. De momento avancemos de la energía a la materia.

La materia y la masa

Siempre que se habla de la naturaleza de la materia es necesario conocer también el concepto de masa. Al nivel más esencial, la masa de un cuerpo es una medida de la cantidad de materia que contiene. En la vida cotidiana, la masa se suele identificar con el peso. En la Tierra no supone ningún problema porque ambas cantidades son proporcionales entre sí: si doblamos la masa de un objeto, también doblamos su peso. Pero en el espacio vacío los objetos no tienen ningún peso, aunque la masa siga siendo la misma.

Con todo, ni tan siquiera la masa permanece siempre constante.

Cuanto más deprisa se mueve un cuerpo, más crece su masa. Esto no nos lo enseñan en el colegio y a Isaac Newton lo habría dejado estupefacto, porque se trata de otra de las consecuencias de la naturaleza del espacio-tiempo que esclarece la teoría especial de la relatividad de Einstein. Si se está preguntando usted por qué no observamos este hecho en la vida cotidiana, le diré que se debe a que por lo común no nos topamos con objetos que se muevan a la velocidad de la luz, que es cuando el efecto se vuelve apreciable. Por ejemplo, si un objeto se mueve al 87 % de la velocidad de la luz en relación con un observador, este comprobará que ha doblado la masa que tenía cuando estaba quieto, y si un cuerpo se mueve al 99,5 % de la velocidad de la luz, multiplicará por diez la masa que tenía cuando se encontraba «en reposo». Pero hasta el proyectil más veloz viaja tan solo al 0.0004 % de la velocidad de la luz, lo que significa que en términos generales no experimentamos los efectos relativistas ni cambios de masa en los objetos en movimiento.

El incremento de la masa de un objeto cuando alcanza una fracción significativa de la velocidad de la luz no implica un aumento de tamaño ni que crezca la cantidad de átomos que contiene, sino que adquiere una cantidad de movimiento mayor (y cuesta más detenerlo) de lo esperable simplemente a partir de la masa que tiene cuando está «en reposo». De acuerdo con la mecánica newtoniana, la cantidad de movimiento de un objeto es el producto de su masa por su velocidad, lo que significa que la cantidad de movimiento aumenta de forma proporcional a la velocidad: si se dobla la velocidad, se dobla la cantidad de movimiento. Pero la mecánica newtoniana no dice nada de que la masa aumente cuando un objeto se encuentra en movimiento. La relatividad especial brinda una fórmula «relativista» diferente (y más correcta) para la cantidad de movimiento, la cual deja de ser proporcional a la velocidad del objeto. De hecho, la cantidad de movimiento se vuelve infinita cuando un objeto alcanza la velocidad de la luz.

Esta es una explicación útil para entender por qué no hay nada capaz de viajar más rápido que la luz (otra de las predicciones de la relatividad especial). Consideremos la energía necesaria para que un objeto se mueva más deprisa. A velocidades bajas esa energía se transforma en energía cinética (energía de movimiento) a medida

que el objeto se acelera. Pero cuanto más se acerca ese objeto a la velocidad de la luz, más difícil es conseguir que vaya más rápido, y más energía dedica a incrementar su masa en lugar de su velocidad. Esta concepción conduce a la ecuación más famosa de la física: $E = mc^2$, la cual relaciona la masa (m) con la energía (E) y con el cuadrado de la velocidad de la luz, (c) y sugiere que cualquiera de esas cantidades se puede transformar en la otra. En cierto sentido, la masa se puede concebir como energía congelada. Y, como la velocidad de la luz al cuadrado da un número tan grande, una pequeña cantidad de masa se puede convertir en una gran cantidad de energía o, a la inversa, una cantidad elevada de energía se congela en muy poca masa.

Por tanto, vemos que la ley de la conservación de la energía admite una generalización más rigurosa convertida en ley de la conservación de la energía y de la masa: la cantidad total de energía más la masa que hay en el universo se mantienen constantes a lo largo del tiempo. En ningún sitio resulta más clara esta idea, o más trascendental, que en el mundo subatómico, donde $E = mc^2$ permitió desentrañar la fisión nuclear y la liberación de energía por parte del núcleo atómico. Y esta ecuación es lo que hay detrás de medio siglo de laboratorios aceleradores de partículas que hacen colisionar chorros de partículas subatómicas a energías cada vez más altas para crear materia nueva (partículas nuevas) a partir de la energía de colisión. Pero hay una serie de reglas sobre los tipos de partículas materiales que se pueden crear a partir de energía, y dedicaremos el siguiente apartado a comentar algunas de ellas.

Los elementos esenciales de la materia

Hace más de un siglo Ernest Rutherford, con la ayuda de Hans Geiger y Ernest Marsden, examinó por primera vez el interior de los átomos lanzando partículas alfa contra una lámina fina de oro y observando cuántas la atravesaban y cuántas rebotaban en ella. Desde entonces los físicos están obsesionados con profundizar cada vez más en el mundo subatómico. Primero revelaron la estructura de los átomos (nubes de electrones alrededor de un núcleo minúsculo y denso). Después escudriñaron el interior del propio

núcleo y descubrieron que está formado por elementos aún más pequeños llamados protones y neutrones. Y, por último, ampliaron aún más la imagen para revelar los cuarks elementales que se ocultan en el interior de los protones y neutrones. Para hacernos una idea de la escala, si infláramos un átomo hasta conferirle el tamaño de una casa, entonces el volumen dentro de un protón o neutrón en el que se encuentran confinados los cuarks tendría el tamaño de un solo grano de sal. Y no olvidemos que los átomos ya son de por sí increíblemente diminutos: caben más átomos en un solo vaso de agua que vasos de agua en todos los mares del mundo.

En el colegio nos enseñan que la fuerza electromagnética es una forma de atracción o repulsión eléctrica o magnética, pero a una escala atómica desempeña un papel más trascendental. Los átomos se unen entre sí en todo tipo de combinaciones para formar moléculas simples y compuestos complejos y, en última instancia, la inmensa variedad de materiales diversos que observamos a nuestro alrededor. Pero la manera en que los átomos se unen entre sí depende de la disposición que adoptan sus electrones en torno a cada núcleo atómico, lo cual constituye, por supuesto, la esencia misma de la química, y estas combinaciones de átomos para dar lugar a la materia que conforma nuestro mundo se deben casi por completo a la fuerza electromagnética que actúa entre los electrones. Tanto es así que la fuerza electromagnética, junto con la gravitación, es la responsable, ya sea directa o indirecta, de casi todos los fenómenos que percibimos en la naturaleza. A una escala microscópica, los materiales mantienen su cohesión debido a las fuerzas electromagnéticas que actúan entre los distintos átomos. A una escala cósmica es la gravitación la que mantiene unida la materia.

En el interior del núcleo atómico el mundo es muy diferente. Los núcleos están formados por dos clases de partículas: los protones con carga positiva y los neutrones con carga neutra (que reciben el nombre conjunto de nucleones). Pero la repulsión electromagnética entre los protones debería desmembrar el núcleo, ya que, además, a esta escala diminuta la gravedad es demasiado débil para ejercer ningún efecto. Sin embargo, los elementos constitutivos del núcleo se mantienen bien cohesionados. Esto es así gracias a una fuerza distinta que actúa como un aglutinante para pegar protones a

neutrones y hasta protones a protones, a pesar de la repulsión entre sus cargas positivas. Este agente se denomina fuerza nuclear fuerte y alcanza su máxima intensidad entre los elementos todavía más minúsculos que componen los protones y neutrones: los mismísimos cuarks, que permanecen unidos mediante «partículas portadoras de fuerza» llamadas gluones. Por tanto, mientras que los cuarks se atraen unos a otros intercambiando gluones, un cuark y un electrón interaccionan entre sí a través de la fuerza electromagnética (puesto que ambos tienen carga eléctrica) intercambiando fotones.

Las reglas cuánticas que determinan la estructura, las formas y los tamaños de los núcleos atómicos son muy complejas y no las expondré aquí. Pero lo que contribuye a la estabilidad de los núcleos y, por tanto, de los átomos y, por tanto, de toda la materia que nos rodea, incluidos nosotros mismos, es en última instancia la interrelación entre la fuerza electromagnética de «repulsión» que actúa entre los protones de carga positiva, y la fuerza nuclear de «atracción» que actúa entre todos los nucleones (que es de por sí un remanente de la fuerza «fuerte», es decir, la fuerza de atracción «gluónica» interna entre los cuarks alojados dentro de los nucleones).

Y hay una fuerza más (la cuarta y última fuerza —conocida— de la naturaleza) que también se encuentra (en su mayoría) confinada dentro de los núcleos atómicos. Esta se conoce sencillamente como fuerza nuclear débil, y emerge del intercambio de bosones W y Z entre ciertas partículas (del mismo modo que los cuarks intercambian gluones entre sí y que los electrones intercambian fotones). Igual que la fuerza nuclear fuerte, esta fuerza débil también actúa a distancias muy cortas, y sus efectos no se observan directamente. En cambio, estamos muy familiarizados con los procesos físicos que desencadena esta fuerza, ya que hace que los protones y neutrones se transformen unos en otros, lo que a su vez produce radiactividad beta: partículas con carga eléctrica que salen expulsadas de los núcleos. Hay dos tipos de partículas beta: electrones y sus equivalentes de antimateria: los positrones, que son idénticos a los electrones, pero con una carga eléctrica opuesta. El proceso es bastante simple: si en un núcleo se da un desequilibrio entre el número de protones y de neutrones que contiene, lo que lo volverá inestable, entonces uno o más protones o neutrones se

transformarán en el otro para recuperar el equilibrio. Durante el proceso ni se crea ni se pierde un electrón ni un positrón (lo que garantiza que la carga eléctrica se mantiene). De ahí que un núcleo con demasiados neutrones experimente una desintegración beta en la que un neutrón cambiará a protón y se cederá un electrón, de manera que su carga negativa contrarreste debidamente la carga positiva del protón creado (ya que el neutrón original no portaba ninguna carga eléctrica). En el caso contrario, un exceso de protones provocará que uno de ellos se convierta en un neutrón más un positrón portador de la carga eléctrica positiva del protón, lo que dejará tras de sí un núcleo atómico más estable.

Cada protón y cada neutrón contienen tres cuarks, de los que existen dos clases (o «sabores») conocidas con los apelativos un tanto imaginativos de «arriba» y «abajo». Cada una de estas variedades porta distintas fracciones de la carga eléctrica. Un protón contiene dos cuarks arriba, cada uno de ellos con una carga positiva equivalente a dos tercios de la carga negativa de un electrón, y un cuark abajo con una carga negativa que asciende tan solo a un tercio de la del electrón. Todos juntos suman $+1$, que es la carga positiva correcta del protón. El neutrón, por su parte, está formado por dos cuarks abajo y un cuark arriba, de forma que su carga global equivale a cero.

En total hay cuarks de seis sabores distintos, cada uno de ellos con una masa diferente. Si los cuarks que conforman el núcleo atómico se conocen como arriba y abajo, los otros cuatro portan nombres igual de arbitrarios, que son los cuarks «extraño», «encantado», «fondo» y «cima». Estos últimos son más pesados que los cuarks arriba y abajo, pero solo existen fugazmente. Por último, además de la carga *eléctrica*, los cuarks también cuentan con otra propiedad que se conoce como carga *de color*, la cual guarda relación con la fuerza nuclear fuerte y ayuda a explicar cómo interaccionan los cuarks entre sí[17].

Los electrones pertenecen a otra clase de partículas llamadas leptones, de las cuales también hay seis tipos que incluyen, además del electrón, el muon y el tauon (primos pesados y de corta duración del electrón), así como tres clases de neutrinos (partículas muy ligeras y casi indetectables que se forman durante la desintegración beta). Los leptones no perciben la fuerza nuclear

fuerte y no portan carga de color.

Resumiendo, de acuerdo con los conocimientos actuales, el modelo estándar de la física de partículas nos dice que, en general, hay dos clases de partículas: las partículas materiales (o fermiones), que incluyen seis variedades de cuarks y seis de leptones; y las partículas portadoras de fuerza (los bosones), que incluyen los fotones, los gluones, los bosones W y Z y, por supuesto, el bosón de Higgs, del que hablaré más adelante.

Si todo esto le parece de una complejidad innecesaria, le aliviará saber que en la mayoría de casos prácticos no hace falta tenerla en cuenta. Todo lo que vemos (todo lo que conforma nuestro mundo, incluido el cuerpo humano), así como todo lo que vemos en el espacio (el Sol, la Luna y las estrellas), todo se compone de átomos, y todos los átomos están formados, a su vez, por tan solo dos clases de partículas: los cuarks y los leptones. De hecho, toda la materia atómica consiste únicamente en las dos primeras variedades de cuarks (los cuarks arriba y abajo) más uno de los leptones (el electrón). Aunque tal vez se sorprenda al saber que la partícula de materia más común es el neutrino.

Breve historia de la materia y la energía

Entonces, ¿cómo y cuándo surgió toda esta materia por primera vez? Para entenderlo tenemos que volver a ampliar la perspectiva para escudriñar el cosmos a las escalas más grandes.

Desde hace casi un siglo sabemos que el universo en que vivimos se está expandiendo. La comunidad astronómica observó que la luz procedente de galaxias lejanas se concentra en el extremo rojo del espectro electromagnético (o, dicho de otra manera, manifiesta un desplazamiento al rojo), lo que indica que esas galaxias se están alejando de nosotros. De hecho, cuanto más distan las galaxias, mayor desplazamiento al rojo presenta su luz y, por tanto, más deprisa se mueven. Aun así, ver que hay galaxias que se alejan de nosotros en todas direcciones no significa que ocupemos una posición privilegiada en el centro del universo. Más bien significa que todas las galaxias se alejan unas de otras porque el espacio que hay entre ellas se está expandiendo. Nótese que esta expansión no afecta al *interior* de los cúmulos de galaxias, como el Grupo Local al

que pertenecen nuestra Galaxia, la galaxia Andrómeda y un puñado de galaxias menores lo bastante cercanas entre sí como para mantenerse unidas por la gravedad y, por tanto, capaces de resistirse a la expansión del universo.

Pero ¿qué tiene que ver la expansión del universo con el origen de la materia y la energía?, se preguntará usted. Bueno, esa expansión es una de las pruebas más convincentes que tenemos de la Gran Explosión (*Big Bang*), el instante en el que nació nuestra parte del universo en un estado de temperatura y densidad increíblemente elevadas hace 13 820 millones de años. En otras palabras, si el universo que vemos se está expandiendo en la actualidad, puesto que las galaxias se alejan unas de otras, entonces todo tuvo que estar mucho más concentrado en el pasado. Si nos remontamos lo suficiente en el tiempo, tuvo que haber algún instante en el que toda la materia y el espacio que la contiene estuvieron apretados entre sí. Por tanto, no hay ningún lugar del universo al que podamos viajar para plantar un banderín que diga que la Gran Explosión sucedió ahí. La Gran Explosión ocurrió en todas las partes del universo. Y, para complicar aún más las cosas, si el universo tiene un tamaño infinito ahora (como bien podría ser), entonces ya tuvo que tener un tamaño infinito durante la Gran Explosión (puesto que no podemos expandir algo finito para convertirlo en infinito, ¡a menos que dispongamos de un tiempo infinito para hacerlo!). Es importante asimilar el concepto de que la Gran Explosión ocurrió *en todas partes* dentro de un espacio que ya era infinito, y no en algún *lugar* particular.

Una interpretación de esta idea más actualizada y más lógica desde un punto de vista conceptual es que la Gran Explosión a la que nos referimos no fue más que un suceso «local». Se limitó a crear el universo visible que tenemos a nuestro alcance, mientras que la totalidad del universo infinito contiene otras regiones distantes del espacio situadas más allá de lo que nunca podremos llegar a ver y que atravesaron su propia gran explosión. Esta es una de las formas en que se explica la idea del multiverso, la cual retomaré en el capítulo 8.

Hay muchos más indicios que también respaldan la teoría de la Gran Explosión, como la abundancia relativa de los elementos ligeros. En torno a tres cuartas partes de la masa de toda la materia

visible en el universo consiste en hidrógeno, y una cuarta parte es helio (el siguiente elemento más ligero)[18]. El resto de elementos solo existe en una cantidad minúscula y la mayoría se formó en el seno de las estrellas mucho después de la Gran Explosión. La teoría de la Gran Explosión predice este predominio del hidrógeno y el helio en el universo y coincide a la perfección con lo observado. Y lo mejor de todo es que no necesitamos viajar por el universo para determinar su composición. La luz que recolectamos con los telescopios porta en sí misma la firma delatora de los átomos distantes que la generaron o que ha atravesado a lo largo de su viaje hasta alcanzar la Tierra. El hecho de que podamos conocer los ingredientes del universo estudiando tan solo la luz que nos llega desde el espacio es una de las ideas más hermosas de la ciencia.

Otro indicio de la Gran Explosión (cuyo descubrimiento en 1964 confirmó al fin esta teoría más allá de toda duda razonable) es la denominada radiación cósmica de fondo de microondas. Esta luz arcaica que baña todo el espacio se formó poco después de la Gran Explosión, cuando surgieron por primera vez los átomos neutros, durante un periodo de la historia del universo que se conoce como la «era de la recombinación». Ocurrió 378 000 años después de la Gran Explosión, cuando el espacio se había expandido y enfriado lo suficiente para que los protones y las partículas alfa[19], ambos con carga positiva, capturaran electrones y formaran átomos de hidrógeno y helio. Se cree que antes de esto los electrones eran demasiado energéticos para unirse a los protones y las partículas alfa y dar lugar a átomos neutros; en consecuencia, los fotones (las partículas de luz) no podían viajar con mucha libertad sin chocar e interaccionar con estas partículas con carga eléctrica, de modo que todo el espacio estaría sumido en un fulgor brumoso. Pero, en cuanto el universo se enfrió lo bastante como para que se formaran átomos, el espacio se volvió transparente y los fotones consiguieron viajar con libertad. Esa luz lleva viajando por el universo en todas direcciones desde entonces.

Aquellas primeras luces también han ido perdiendo energía a medida que el espacio se expande, pero no a cambio de frenarse, puesto que la luz siempre viaja a una velocidad constante. En realidad, lo que se ha reducido con la expansión del espacio por el que se mueve es la longitud de onda de la luz, de modo que en la

actualidad, miles de millones de años después, esa luz ya no se encuentra en la parte visible del espectro, sino en forma de microondas. Esta radiación de fondo se ha medido, y se ha comprobado que se corresponde con una temperatura del espacio profundo algo inferior a tres grados por encima del cero absoluto, un valor que concuerda con la predicción de la teoría de la Gran Explosión (la cual, por cierto, fue anterior a dicha medición).

Pero viajemos a un instante anterior en la vida de nuestro universo, mucho antes incluso de que llegaran a formarse átomos. El universo comenzó como una burbuja de energía a una temperatura extraordinariamente elevada, y en cuestión de una billonésima de segundo ya se había enfriado lo suficiente para que se formaran partículas subatómicas (cuarks y gluones) que se condensaron a partir de esa energía a medida que el espacio se expandía. Para empezar, aquellas partículas eran muy energéticas y vagaban por ahí sin ninguna limitación, inmersas en una sopa caliente denominada plasma cuark-gluon a una temperatura de billones de grados Celsius. Después, cuando el universo no tenía más que una millonésima de segundo, empezaron a aglutinarse para formar protones y neutrones (junto con otras partículas más pesadas). La materia atravesó varios estadios evolutivos durante aquellos primeros segundos, de manera que emergieron y desaparecieron partículas diversas. Es ahí donde encontramos uno de los mayores interrogantes que aún quedan por resolver dentro de la física: el misterio de la antimateria perdida.

Unos años después de que Paul Dirac predijera su existencia en 1928, Carl Anderson descubrió la antimateria en los rayos cósmicos: partículas de alta energía procedentes del espacio que chocan sobre todo con moléculas de oxígeno y de nitrógeno en la alta atmósfera de la Tierra y generan una lluvia de partículas secundarias que incluyen la antipartícula del electrón: el positrón. Ahora sabemos que todas las partículas elementales de materia (los fermiones) tienen equivalentes especulares de antimateria[20]. Cuando un electrón y un positrón entran en contacto, se aniquilan por completo el uno al otro combinando sus masas y transformándolas en energía pura mediante la fórmula $E = mc2$.

El proceso contrario a esta aniquilación también se da de manera constante a las escalas más diminutas. Si pudiéramos

ampliar el mundo cuántico, veríamos que las partículas y sus antipartículas correspondientes emergen a la existencia y desaparecen de ella continuamente en un intercambio constante de materia y energía. Por tanto, un fotón, que no es más que un paquete de energía electromagnética, puede transformarse en un electrón y un positrón mediante un proceso conocido como creación de pares. Pero en el universo más primigenio y denso, durante la aparición y desaparición de las partículas y antipartículas sucedió que, por alguna razón, se impuso la materia frente a la antimateria. El mero hecho de que estemos aquí indica que tuvo que ocurrir así. Todavía nos queda por desentrañar qué pasó con la «antimateria perdida» que, por fortuna para nosotros, permitió la profusión adicional de materia que observamos en la actualidad.

Unos minutos después de la Gran Explosión se dieron las condiciones adecuadas para que protones (núcleos de hidrógeno) se fusionaran entre sí para dar lugar a helio [21] y a una cantidad diminuta del elemento número tres, el litio. Pero a medida que el universo continuaba expandiéndose, la temperatura y la presión descendieron por debajo del umbral que impide la formación de núcleos más pesados mediante la fusión de los más ligeros. Esto es así porque para que se produzca la fusión nuclear, los núcleos atómicos implicados deben ser lo bastante energéticos como para vencer la repulsión mutua de las cargas positivas, pero por debajo de cierta densidad material y de cierta temperatura deja de ocurrir esto.

Algo después, tras la era de la recombinación, los átomos empezaron a aglutinarse bajo el influjo de la gravedad (y estoy obviando el papel esencial que desempeñó la materia oscura aquí, pero hablaré más sobre ella en el capítulo 8) y empezaron a formarse las primeras nubes de gas (protogalaxias) en cuyo interior se concentraban acumulaciones de gas aún más densas, debido a la gravedad, hasta que se calentaron lo suficiente como para que el proceso de fusión recomenzara. Así fue como prendieron las estrellas, y las reacciones termonucleares que se produjeron en su interior dieron lugar a elementos nuevos: carbono, oxígeno, nitrógeno junto con muchos de los elementos que encontramos en la Tierra.

La mayor parte de esta primera generación de estrellas del

universo ya no existe, puesto que habrán explotado como supernovas hace mucho tiempo, con lo que diseminaron por el espacio buena parte de los elementos químicos que contenían y dejaron tras de sí materia compactada en forma de estrellas de neutrones o agujeros negros. Los elementos más pesados (es decir, todo lo que cae más allá del hierro en la tabla periódica) solo se forman durante episodios violentos, como novas, supernovas y la coalescencia de estrellas de neutrones. Cuanto más elevada es la temperatura y más extremas son las condiciones en el seno de una estrella, mejor se da el proceso de la nucleosíntesis y más pesados son los elementos que se forman, como plata, oro, plomo y uranio. Esto se debe a que el interior de las estrellas solo alcanza la temperatura y la densidad necesarias para fabricar los elementos más pesados durante estos instantes intensos de su existencia, cuando se encuentran densamente comprimidas y al mismo tiempo se desprenden con violencia de sus capas externas.

La materia que expulsan las estrellas al estallar se mezcla con el gas interestelar y puede volver a aglutinarse para dar lugar a una nueva generación de estrellas. El hecho de que encontremos estos elementos pesados en la Tierra indica que el Sol es una de esas estrellas de segunda generación (como mínimo). Por eso se dice que estamos hechos de polvo de estrellas, porque en verdad muchos de los átomos del cuerpo humano se formaron en el interior de las estrellas.

Espero haber transmitido la idea de cómo se formó la materia en el universo y la íntima relación que mantienen la materia y la energía, el espacio y el tiempo. Si es así, ya estamos preparados para zambullirnos en el microcosmos, el mundo de lo muy pequeño que no se puede describir mediante la teoría general de la relatividad. Es hora de ahondar en el segundo pilar de la física: la mecánica cuántica.

5. El mundo cuántico

Joseph Banks, presidente de la prestigiosa Real Sociedad de Londres, fundó en 1799 un nuevo organismo: la Real Institución de Gran Bretaña (Royal Institution of Great Britain), con el objeto de presentar «inventos y avances mecánicos útiles» y de «impartir ciclos de conferencias filosóficas y cursos sobre experimentos» al público general. Desde entonces la Real Institución, como se la conoce hoy en día, ha seguido ofreciendo conferencias y actos públicos (como sus Friday Evening Discourses, conferencias públicas celebradas en su auditorio Faraday) que han sido parte integral de su programa desde que las instauró el mismísimo Michael Faraday en 1826. Yo he tenido el honor de impartir dos de estas conferencias, la última en el año 2013, en la que hablé sobre el tema de este capítulo: la mecánica cuántica.

La mecánica cuántica se considera, con razón, la teoría científica más fascinante y, al mismo tiempo, más desconcertante y frustrante desarrollada jamás por el ser humano. Una parte de mi conferencia en la Real Institución estuvo dedicada al famoso experimento de la doble rendija, que describe lo que el físico estadounidense Richard Feynman denominó el «gran misterio de la mecánica cuántica». Durante aquella charla planteé un reto al público asistente después de limitarme a perfilar el asombroso resultado que arroja ese experimento (al lanzar de una en una varias partículas subatómicas contra una pantalla provista de dos rendijas estrechas, las partículas se comportan como si cada una de ellas pasara por *ambas* rendijas al mismo tiempo y dan lugar a un patrón de interferencia en una segunda pantalla situada detrás de la primera): si alguna persona era capaz de dar una explicación basada en el «sentido común» a aquello, que viniera a contármela porque sin duda sería merecedora de un Nobel.

Lancé aquella broma despreocupada sabiendo que nadie ha

encontrado jamás una explicación sencilla para este resultado clásico a pesar de las muchas décadas de debate y los cientos de pruebas ingeniosas realizadas, lo que ha conducido a la comunidad de físicos a concluir de mala gana que, sea lo que sea en realidad, *no* tiene una explicación dentro del ámbito del sentido común. Así se comporta la materia en el mundo cuántico y debemos aceptarlo sin más. Cuando lancé aquel singular desafío también di por supuesto que me dirigía tan solo al centenar de personas que asistió a escucharme aquel viernes por la tarde. Pero la Real Institución cuelga en la Red gran parte de sus contenidos divulgativos, entre ellos mi conferencia. Desde entonces he recibido cientos de mensajes electrónicos de aficionados a la ciencia declarando haber resuelto este gran misterio cuántico y sugiriendo que tal vez los especialistas olvidaron tener en cuenta este o aquel mecanismo o detalle.

Solía contestar, pero confieso que ya no lo hago. Así que aprovecharé para resarcir aquí de las respuestas no enviadas a quienes siguen reflexionando sobre los misterios de la mecánica cuántica, y para describir algunos de sus rasgos más importantes y menos intuitivos. En este capítulo echaremos una ojeada breve a lo que nos cuenta este segundo pilar de la física moderna sobre el microcosmos. Tras toda una carrera de investigación, que atraviesa ya su cuarta década, dedicada al estudio y la aplicación de este campo, primero en la física nuclear y en tiempos más recientes dentro de la biología molecular, no es de extrañar que la mecánica cuántica me parezca la teoría más poderosa y trascendente de toda la ciencia. Al fin y al cabo, conforma los cimientos sobre los que se asienta buena parte de la física y la química actuales y ha revolucionado el conocimiento sobre la composición del mundo a partir de sus elementos constitutivos más minúsculos.

Manual básico de mecánica cuántica

A finales del siglo XIX la física parecía encontrarse en un estado de completitud. Había proporcionado la mecánica newtoniana, el electromagnetismo y la termodinámica (de la que hablaré en el capítulo 6) y había revelado que, juntas, estas tres ramas de la física

describen con éxito el movimiento y el comportamiento de los objetos cotidianos y prácticamente todos los fenómenos que ocurren a nuestro alrededor, desde las balas de cañón hasta los relojes, desde tormentas a trenes de vapor, de imanes a motores y de péndulos a planetas. En conjunto, el estudio de todo lo anterior recibe el nombre de física clásica y sigue siendo lo que más se enseña en los colegios.

Sin embargo, el asunto no se acaba en la física clásica, por muy buena que siga siendo en la actualidad. Cuando la comunidad de físicos centró la atención en los elementos microscópicos de la materia (átomos y moléculas) descubrió fenómenos nuevos imposibles de explicar con la física conocida. Era como si las leyes y ecuaciones que aplicaban dejaran de funcionar. La física estaba a punto de sufrir un cambio de paradigma de magnitudes sísmicas.

El primer gran avance teórico (el concepto de cuanto) llegó con el físico alemán Max Planck. Durante una conferencia celebrada en diciembre de 1900 planteó la revolucionaria idea de que la energía calorífica irradiada por un cuerpo caliente va unida a la frecuencia a la que vibran sus átomos y, como consecuencia, ese calor irradiado es granulado, en lugar de continuo, y se emite en forma de paquetes discretos de energía que recibieron el nombre de cuantos. En cuestión de unos años Einstein defendió que no es solo la radiación de Planck la que se emite en paquetes, sino que toda la radiación electromagnética, incluida la luz, llega en forma de cuantos discretos. En la actualidad cada cuanto de luz (una partícula de energía lumínica) se denomina fotón.

La propuesta einsteiniana de que la luz tiene naturaleza cuántica era algo más que una mera suposición. Sirvió para explicar uno de los misterios científicos más notables de la época, el llamado efecto fotoeléctrico, un fenómeno que consiste en que la luz es capaz de arrancar electrones de los átomos de un metal al proyectarla contra su superficie. Este efecto no se podría explicar si la luz fuera una onda porque, en ese caso, el incremento de la intensidad (el brillo) de la luz implicaría un aumento de su energía, así que sería de esperar que los electrones arrancados del metal salieran despedidos más deprisa. Y, sin embargo, no es así. Lo único que ocurre es que salen más. Pero si la energía de la luz es proporcional a su frecuencia en lugar de ser proporcional a su intensidad, tal como

propuso Einstein, entonces el aumento de la frecuencia (por ejemplo, al pasar de la luz visible al rango del ultravioleta) haría que los electrones salieran despedidos con más energía. Y, a la inversa, mantener igual la frecuencia (el color) de la luz y aumentar su brillo solo implicaría la producción de más cantidad de fotones y que salgan despedidos más electrones. Y esto es exactamente lo que se observa en los experimentos, y la explicación de Einstein cuadraba a la perfección.

Sin embargo, quedaban, y aún quedan, numerosos indicios en contra que sugieren que la luz es una onda y no una corriente de partículas. Entonces ¿qué es? ¿Es la luz una onda o una partícula? La respuesta, frustrante y contraria a la intuición y el sentido común, es que puede comportarse de ambas maneras, dependiendo de cómo la observemos y del tipo de experimento que se emplee para comprobarlo.

Pero la luz no es lo único que muestra esta naturaleza esquizofrénica. Hay partículas de materia, como los electrones, que también exhiben una naturaleza de onda. Esta noción general, probada y confirmada hace casi un siglo, se conoce como dualidad onda-corpúsculo y es una de las ideas centrales de la mecánica cuántica. Esto no significa que un electrón sea una partícula y una onda al mismo tiempo, sino más bien que si preparamos un experimento para comprobar la naturaleza de partícula de los electrones, veremos que en efecto se comportan como partículas. En cambio, si ideamos otro experimento para comprobar si los electrones tienen las propiedades de las ondas (como la difracción o la refracción o la interferencia entre ondas), veremos que se comportan como ondas. Lo único que ocurre es que no podemos realizar un experimento capaz de evidenciar *al mismo tiempo* la naturaleza ondulatoria y corpuscular de los electrones. Es absolutamente indispensable señalar aquí que, aunque la mecánica cuántica predice de forma correcta los resultados de tales experimentos, *no* revela *qué es un electrón*, sino solo lo que se ve al realizar ciertos experimentos para demostrarlo. La única razón por la que esto ha dejado de volver locos de exasperación a los físicos es porque hemos aprendido a aceptarlo. Este equilibrio entre lo que podemos saber de forma simultánea sobre la naturaleza corpuscular de un electrón (su posición en el espacio) y su naturaleza

ondulatoria (lo rápido que viaja) se rige por el principio de incertidumbre de Heisenberg, que es considerado una de las ideas más importantes de toda la ciencia y la piedra angular de la mecánica cuántica.

El principio de incertidumbre impone un límite a lo que se puede medir y observar, pero mucha gente, incluso especialistas en física, tiende a malinterpretar lo que esto significa. A pesar de lo que encontremos en los manuales de física, el formalismo de la mecánica cuántica no establece que un electrón no pueda tener a la vez una posición y una velocidad definidas, sino tan solo que no se pueden *conocer* ambas cantidades al mismo tiempo. Un error habitual relacionado con lo anterior consiste en creer que las personas desempeñan una especie de papel crucial dentro de la mecánica cuántica: que nuestra consciencia influye en el mundo cuántico o incluso le da existencia en el momento en que lo medimos. Esto no tiene ningún sentido. El universo en el que nos encontramos, lo que incluye sus elementos constitutivos más esenciales a una escala cuántica, ya existía mucho antes de que comenzara a haber vida en la Tierra, no permaneció en un estado parecido a un limbo difuso esperando a que llegáramos las personas para medirlo y hacerlo real.

A mediados de la década de 1920 los físicos empezaron a darse cuenta de que el concepto de cuantización es más general que la «granularidad» de la luz o la naturaleza ondulatoria de la materia. Muchas propiedades físicas que conocemos como continuas son, en realidad, discretas (digitales en lugar de analógicas) cuando se observan a una escala subatómica. Por ejemplo, los electrones de los átomos están «cuantizados» en el sentido de que solo tienen ciertas energías específicas y nunca energías intermedias a esos valores discretos. Sin esta propiedad los electrones sufrirían pérdidas continuas de energía mientras orbitan alrededor del núcleo[22], lo que significa que los átomos no serían estables y que la materia compleja, incluida la vida, no podría existir. De acuerdo con la teoría electromagnética del siglo XIX, anterior a la teoría cuántica, los electrones, de carga negativa, deberían precipitarse en espiral hacia el núcleo del átomo, de carga positiva. Pero su estado energético cuantizado impide que esto pase. Ciertas reglas cuánticas también definen en qué estados energéticos se encuentran los

electrones y cuál es su distribución dentro de los átomos. De igual manera, las reglas de la mecánica cuántica determinan cómo se unen unos átomos a otros para formar moléculas, lo que convierte la mecánica cuántica en el fundamento de toda la química.

Los electrones pueden saltar de un estado energético a otro soltando o absorbiendo la cantidad correcta de energía. Pueden descender a un estado energético más bajo soltando un cuanto de energía electromagnética (un fotón) que tenga el mismo valor exacto que la diferencia energética entre los dos estados implicados. De igual modo pueden pasar a un estado superior absorbiendo un fotón de la energía adecuada. El mundo submicroscópico, hasta la escala atómica o más reducida aún, se comporta, pues, de una manera muy distinta a la que nos tiene acostumbrados el mundo cotidiano. Cuando describimos la dinámica de algo, como un péndulo o una pelota de tenis, una bicicleta o un planeta, tratamos con sistemas formados por billones de átomos que distan mucho de la granularidad del universo cuántico. Esto permite estudiar el comportamiento de los objetos usando la mecánica clásica y las ecuaciones de la dinámica de Newton, cuyos resultados indican la ubicación exacta de un objeto, la energía o el estado de movimiento, todas ellas propiedades que se pueden conocer a la vez en un instante determinado.

Pero para estudiar la materia a la escala cuántica hay que renunciar a la mecánica de Newton y usar las matemáticas, muy diferentes, de la mecánica cuántica. Lo habitual es resolver la ecuación de Schrödinger para calcular una cantidad denominada función de onda que describe no el movimiento de una partícula individual a lo largo de un camino definido, sino la evolución de su «estado cuántico» con el paso del tiempo. La función de onda puede describir el estado de una sola partícula o de un conjunto de ellas, y su valor proporciona la *probabilidad* de, por ejemplo, encontrar un electrón con una serie de propiedades o con una localización espacial determinadas *en caso de que midiéramos esa propiedad*.

El hecho de que la función de onda tenga un valor en más de un punto espacial suele interpretarse erróneamente como que el propio electrón se encuentra físicamente disperso por el espacio cuando no lo medimos. Pero la mecánica cuántica no dice qué está haciendo el electrón cuando no lo miramos, sino tan solo qué podemos esperar

ver cuando sí lo hacemos. Si esta afirmación no le infunde tranquilidad, sepa que no le pasa solo a usted. No está pensada para convencer a nadie (ni tampoco, por supuesto, para desilusionar); simplemente constata el consenso de todos los físicos sobre el significado de la mecánica cuántica.

Más allá de esto existe toda una variedad de maneras distintas de explicar la naturaleza del mundo cuántico que se conocen como «interpretaciones» de la mecánica cuántica, y los debates entre quienes defienden cada una de esas concepciones diferentes han existido desde el desarrollo de la mecánica cuántica y no tienen visos de remitir.

Qué significa todo esto

A pesar de su enorme éxito, cuando se ahonda un poco más en lo que desvela la mecánica cuántica sobre el microcosmos es fácil perderse. Nos preguntamos: «Pero ¿cómo puede ser? ¿Qué es lo que no entiendo?». Lo cierto es que nadie tiene la certeza. Ni tan siquiera sabemos si hay algo más que entender. Los físicos han recurrido a términos como extraño, insólito o antiintuitivo para describir el mundo cuántico porque, a pesar de la exactitud y de la lógica matemática de esta teoría, sus números, símbolos y capacidad de predicción son una fachada que oculta una realidad difícil de reconciliar con nuestra concepción terrenal y sujeta al sentido común del mundo cotidiano.

Sin embargo, hay una forma de salir de este atolladero. Como la mecánica cuántica describe tan bien el mundo subatómico y está bien asentada sobre una arquitectura matemática tan completa y poderosa, resulta que podemos apañarnos para aprender a usar sus reglas con la finalidad de emitir predicciones sobre el mundo y de aprovecharlas para desarrollar tecnologías basadas en ellas, dejando el desasosiego y el desconcierto para los filósofos. Al fin y al cabo, el ordenador portátil en el que estoy tecleando no existiría de no ser por el desarrollo de la mecánica cuántica que nos permitió crear la electrónica moderna. Pero si adoptamos esta actitud pragmática, debemos aceptar que nosotros mismos quedamos convertidos en meros *mecánicos* cuánticos, usuarios y técnicos indiferentes a *cómo*

o *por qué* se comporta así el mundo cuántico, que se limitan a aceptarlo y a seguir adelante. Cada fibra de mi cuerpo me dice que un físico no debería conformarse con eso. ¿Acaso no compete a la física *describir* el mundo? La mecánica cuántica, sin una interpretación de sus ecuaciones y símbolos, no es más que un paradigma matemático que permite calcular y predecir resultados de experimentos. No debería bastarnos con eso. La física debería explicar qué revelan esos resultados sobre cómo es el mundo en realidad.

Son muchos los físicos que no estarían de acuerdo con esta afirmación, y esto es un error que se puede rastrear hasta uno de los pensadores más insignes de la historia de la ciencia: el padre de la mecánica cuántica, Niels Bohr. Fue una persona tan influyente que siento cierta culpabilidad al escribir esto porque tengo la impresión de estar traicionando a uno de mis grandes héroes. Pero debo mantenerme fiel a mis convicciones. Sin duda las consideraciones filosóficas de Bohr han modelado el pensamiento de varias generaciones de físicos sobre la mecánica cuántica, pero al mismo tiempo son muchos los que opinan que esas mismas consideraciones desalentaron y frenaron el avance. Bohr sostenía que es un error pensar que el cometido de la ciencia consiste en desentrañar cómo es la naturaleza o en conocer la «verdadera esencia de los fenómenos», porque debe ceñirse tan solo a lo que somos capaces de decir sobre la naturaleza: a los «aspectos de nuestra experiencia». Nada impide que estas dos ideas contrapuestas, la primera ontológica y la segunda epistemológica, sean correctas sin excluirse: un físico debería ser capaz de decir sobre la naturaleza algo idéntico a lo que la naturaleza es o algo muy próximo a eso, pero siempre procurando acercarse al máximo. Esta es una visión «realista» con la que siempre me acabo alineando, a pesar de que me infunde serias dudas una y otra vez.

En el otro extremo de la escala hay un peligro que acecha en las sombras cuando se hace hincapié en lo insólito de la mecánica cuántica en lugar de centrar la atención en su poder y su éxito como teoría científica, porque esto atrae a los charlatanes tanto como una luz brillante a las polillas. Las predicciones indiscutiblemente inexplicables de la mecánica cuántica (como el entrelazamiento, es decir, partículas separadas que mantienen un vínculo de forma

instantánea a través del espacio) han abonado el terreno durante años para todo tipo de sinsentidos seudocientíficos, desde la telepatía hasta la homeopatía. Generaciones de físicos se han preparado para seguir el pragmático dogma de Bohr (conocido como la interpretación de Copenhague de la mecánica cuántica, por la ciudad donde se encuentra el famoso Instituto de Física Teórica de Bohr, en el que a mediados de la década de 1920 se asentaron muchos de los primeros cimientos matemáticos de esta teoría) en parte para evitar la clase de cavilaciones filosóficas que llegan a invadir la palabrería *new-age*.

Al igual que a todos los físicos de varias generaciones, a mí me enseñaron la física cuántica empezando por sus orígenes históricos y por los trabajos de Planck, Einstein, Bohr y otros. Pero mi formación pronto se orientó hacia las técnicas matemáticas (las herramientas) que necesitaba para usar la teoría. Y junto con las matemáticas aprendí un montón de conceptos bautizados con los nombres de los padres de la teoría: regla de Born, ecuación de Schrödinger, principio de incertidumbre de Heisenberg, principio de exclusión de Pauli, notación de Dirac, diagramas de Feynman… la lista continúa. Pero, aunque todo esto es importante para saber si le encontramos un sentido al mundo cuántico, nadie me informó sobre las controversias y los debates filosóficos que mantuvieron todos estos físicos excelsos a lo largo de su vida y que, en gran medida, siguen sin resolverse.

Buena parte de la dificultad para interpretar la mecánica cuántica gira en torno al denominado «problema de la medida»: ¿Cómo es posible que el efímero mundo cuántico se revele con nitidez en cuanto efectuamos una medición? ¿Dónde está la frontera entre el mundo cuántico y el clásico, entre las cosas que no tienen unas propiedades bien definidas cuando se las deja a su aire y la solidez tranquilizadora de lo que medimos y vemos? Muchos de los padres fundadores (hombres como Niels Bohr, Werner Heisenberg y Wolfgang Pauli) creían que era absurdo preocuparse por estas cosas y abogaban por seguir la filosofía de Copenhague que describí hace un momento. Eran felices con el mundo dividido en dos, el comportamiento cuántico y el comportamiento clásico, sin necesidad de relacionar cómo se produce la transición del uno hacia el otro al efectuar mediciones. La mecánica cuántica

funcionaba y con eso les bastaba. Pero esta postura positivista puede entorpecer el avance de la ciencia. Aunque tal vez nos ayude a comprender mejor algunos fenómenos y hasta a desarrollar nuevas tecnologías, no favorece el entendimiento verdadero [23].

La historia de la ciencia está plagada de ejemplos de posturas así. Uno de los más evidentes lo encontramos en la cosmología antigua. A lo largo de dos milenios, desde la Antigüedad hasta el nacimiento de la ciencia moderna, imperó una hegemonía y una aceptación casi universales del modelo geocéntrico del universo: el que situaba la Tierra en el centro del cosmos, mientras que el Sol, junto con todos los planetas y estrellas, orbitaba a nuestro alrededor. Un positivista habría sostenido que, como el modelo funcionaba tan bien para predecir el movimiento de los objetos celestes, no era necesario buscar alternativas para explicar cómo o por qué realizan los desplazamientos que observamos en el firmamento. De hecho, hubo un tiempo en que el modelo geocéntrico concordaba con más precisión con las observaciones astronómicas que el modelo heliocéntrico, correcto y mucho más simple, de Copérnico. Pero interpretar una teoría de una manera concreta por el mero hecho de que funciona es pereza intelectual y ciertamente no responde al verdadero espíritu de lo que debería ser la física. Lo mismo habría que aplicar a la mecánica cuántica. Es bien sabido que el célebre especialista en física cuántica John Bell dijo una vez que el objeto de la física es *comprender* el mundo y que «reducir la mecánica cuántica únicamente a insignificantes operaciones de laboratorio es traicionar esa gran empresa».

Por desgracia hay demasiados físicos, incluso en la actualidad, que no captan esta idea, lo que constituye otro argumento a favor de que la filosofía no es mero egocentrismo gratuito, sino que puede contribuir al avance de la ciencia. Si hiciéramos una encuesta entre especialistas en física cuántica (al menos entre quienes se plantean estas cuestiones) veríamos que una fracción considerable, aunque cada vez menor, sigue adoptando la postura pragmática de Copenhague. Pero cada vez hay más físicos que consideran esa actitud como una renuncia al papel de la física, en lugar de verla como la defensa de una de las muchas interpretaciones posibles (cuya lista incluye ideas tan exóticas como la interpretación de la pluralidad de mundos, la interpretación de las variables ocultas, la

interpretación del colapso dinámico, la interpretación de las historias coherentes y la interpretación relacional, y faltan unas cuantas más por mencionar). Nadie sabe cuál de estas formas diferentes de describir la realidad a escala cuántica es la correcta (si es que alguna lo es). Todas funcionan; todas arrojan de momento las mismas predicciones para los resultados de los experimentos y de las observaciones[24] y todas provienen de las mismas matemáticas. En ocasiones, los seguidores de cada una de estas interpretaciones las defienden como si fueran un dogma, tratando su versión preferida casi como una religión, y no es así como progresará la ciencia.

Y, sin embargo, poco a poco se está logrando un avance en el discernimiento del mundo cuántico. Las técnicas experimentales son cada vez más sutiles y se van descartando ciertas explicaciones. La esperanza es que algún día se descubra de verdad cómo obra la naturaleza su magia cuántica. Si esto le parece lógico, sepa usted que hay muchos físicos que discreparían. Los positivistas sostienen que la ciencia es una mera herramienta para predecir los resultados de los experimentos y que quienes se empeñan en conocer lo que revela la mecánica cuántica sobre la realidad, leyendo más de lo debido en sus matemáticas, harían mejor en dedicarse a la filosofía. En rigor, no todos los defensores de esta concepción positivista de la realidad derivada de la interpretación de Copenhague han despreciado los intentos de profundizar más. A comienzos de la década de 2000 apareció una nueva interpretación antirrealista denominada bayesianismo cuántico (abreviado Qbism y leído /kubismo/), cuyos promotores contemplan la realidad como algo absolutamente subjetivo y sujeto a la experiencia personal. Sus detractores lo han llegado a comparar con el solipsismo.

La elección de una interpretación de la mecánica cuántica debería regirse por algo más que el mero gusto filosófico. El hecho de que emitan las mismas predicciones sobre el mundo no significa que todas las interpretaciones sean equivalentes, ni que tengamos libertad para elegir a nuestro antojo la que más nos guste. Para explicar un aspecto de la realidad a través de la física hay que seguir un proceso de dos pasos. En primer lugar hay que encontrar la teoría matemática, la cual puede ser correcta o no, por supuesto. Pero si nos parece correcta, como ocurrió con las ecuaciones de

campo de la relatividad general de Einstein o la ecuación de la mecánica cuántica de Schrödinger, entonces lo siguiente que necesitamos son formas de interpretar o explicar el significado de las matemáticas, y estas constituirán las historias que asociemos a las matemáticas. Sin ellas no hay modo de relacionar los símbolos y ecuaciones con el universo físico observado, por mucho que nos convenzan estéticamente. Y es tan importante dar con el relato correcto como con la teoría matemática adecuada.

Las distintas interpretaciones de la mecánica cuántica dibujan cuadros muy diferentes de la realidad: o hay universos paralelos (la interpretación de la pluralidad de mundos) o no; o contemplan un campo cuántico físico no local (la interpretación de las variables ocultas de la onda piloto) o no lo contemplan. La naturaleza es indiferente a nuestras miserables disputas sobre cuál es la interpretación correcta de la mecánica cuántica (continúa con su devenir y existe al margen de nuestras percepciones). Si tenemos algún problema para aceptar el comportamiento del mundo cuántico, es nuestro problema. Einstein lo veía así. También era realista. Él creía que la física debería centrarse en describir cómo es el mundo en realidad y que, si hay más de una descripción que encaje con las matemáticas de la mecánica cuántica, entonces no deberíamos quedarnos satisfechos. Yo me siento en buena compañía a este respecto.

Entrelazamiento, medida y decoherencia

Dicho esto, hasta el mismísimo Einstein se equivocaba a veces. Una de las predicciones más insondables e inexplicables de la mecánica cuántica es la idea del entrelazamiento. En el mundo cuántico, dos o más partículas pueden entrelazarse en el espacio de forma instantánea de un modo que desafía la lógica. Esto se conoce por el término técnico de *deslocalización* y se resume en que lo que sucede «aquí» puede afectar y verse afectado de manera instantánea por lo que suceda «allí». Se dice entonces que ambas partículas se describen mediante el mismo «estado cuántico»: la misma función de onda. Einstein siempre se sintió incómodo con la deslocalización y el entrelazamiento, se burlaba de esta idea hablando de una «acción fantasmagórica a distancia» y se negaba a aceptar que

pudiera existir alguna comunicación entre partículas subatómicas que viaje más rápido que la luz, puesto que eso violaría la teoría especial de la relatividad. Pero, en principio, partículas situadas en extremos opuestos del universo pueden mantener este tipo de conexión entre ellas. Los pioneros de la cuántica han evidenciado que el entrelazamiento se deriva de manera natural de sus ecuaciones, y los experimentos realizados entre las décadas de 1970 y 1980 confirmaron que Einstein se equivocó en esto: ahora sabemos de forma empírica que las partículas cuánticas pueden en verdad establecer una conexión instantánea de largo alcance. Ciertamente nuestro universo es deslocalizado.

Muchos investigadores actuales que trabajan en especialidades como la óptica cuántica, la teoría de la información cuántica o incluso la gravitación cuántica ven una conexión profunda entre el entrelazamiento y el problema central de la medida en la mecánica cuántica. En primer lugar, hay que reconocer que un sistema cuántico (por ejemplo, un átomo) es en realidad parte del mundo que lo circunda y, por tanto, no es del todo correcto considerarlo de forma aislada. Hay que incluir en los cálculos el influjo que ejerce ese entorno circundante. Un «sistema cuántico abierto» de este tipo plantea un problema mucho más complejo de resolver, pero, al mismo tiempo, permite avanzar algo en la comprensión de lo que significa efectuar una medición en un sistema cuántico más allá de lo que Niels Bohr calificó sencillamente como «un acto irreversible de amplificación», ya que permite verlo como una manera de describir cómo cristaliza la granularidad cuántica en realidad en el instante en que efectuamos una observación. De hecho, ahora está claro que el entorno que circunda un sistema cuántico, como un átomo, puede realizar la «medición» por sí mismo. No se necesita un observador consciente para ello. Cabría concebirlo como si el átomo se entrelazara cada vez más con el entorno, como si su naturaleza cuántica migrara al entorno, igual que se disipa el calor de un cuerpo caliente. Esta filtración del efímero comportamiento cuántico se conoce como «decoherencia» y forma parte de un campo de estudio muy activo en la actualidad. Cuanto más intenso es el acoplamiento entre el sistema cuántico y su entorno, más entrelazados están y más rápido desaparece el comportamiento cuántico.

En algunos círculos aún se debate si este proceso explica o no por completo el problema de la medida. La espinosa cuestión de cómo resolver el problema de la medida y la frontera entre el mundo cuántico y el mundo clásico de lo más grande cobró celebridad por primera vez con Erwin Schrödinger a mediados de la década de 1930, cuando este físico concibió su famoso experimento mental. A pesar de ser uno de los pioneros y de los fundadores de la materia, Schrödinger procuró dejar constancia de sus propias dudas sobre el significado de la mecánica cuántica. Él se preguntó qué ocurriría si se encierra un gato en una caja con una sustancia radiactiva y un recipiente con un veneno mortal. Mientras la caja permanezca cerrada no habrá forma de saber si la sustancia radiactiva ha emitido o no una partícula que pondría en marcha un mecanismo que libera el veneno, lo que mataría al gato. Lo único que podemos hacer es asignar probabilidades a cada uno de los dos resultados posibles: al abrir la caja o bien se habrá soltado una partícula y el gato estará muerto o bien no se habrá liberado y el gato seguirá vivo. Pero, de acuerdo con las reglas de la mecánica cuántica, mientras la caja permanezca cerrada la partícula subatómica se rige por las leyes del mundo cuántico y hay que contar con que se encuentre en un estado de superposición cuántica en el que habrá sido liberada y no lo habrá sido al mismo tiempo.

Pero entonces, dentro de la caja cerrada, el destino del gato depende de este suceso cuántico. Schrödinger sostenía que, como el propio gato está hecho de átomos, aunque sean billones de ellos, y cada uno es una entidad cuántica, también él debería existir en una superposición cuántica: un estado en el que esté vivo y muerto a la vez. Sin embargo, solo veremos un resultado bien definido al abrir la caja para mirar. Es decir, el gato estará vivo o muerto, pero no en ese limbo intermedio.

Una forma lógica de resolver la cuestión consiste en asumir que esas superposiciones cuánticas experimentan decoherencia con el entorno y, por tanto, no sobreviven mucho tiempo cuando consideramos objetos macroscópicos complejos como un gato, los cuales nunca se encuentran en dos estados al mismo tiempo, ni tan siquiera antes de abrir la caja para mirar. De hecho, aunque es necesario admitir que un átomo radiactivo aislado se encuentra en una superposición en la que se ha desintegrado y no lo ha hecho

hasta que se observa, también hay que tener en cuenta que está rodeado por un entorno complejo de aire, un contador Geiger y un gato, y que se entrelaza rápidamente con todo ello, de tal modo que no sobrevive la opción de que se den ambos resultados al mismo tiempo.

Entonces, ¿está resuelto el problema? Y ¿será que las dos opciones del gato vivo o muerto no reflejan más que nuestra ignorancia sobre su destino hasta que abrimos la caja? Si no es así seguimos sin saber qué proceso físico tiene lugar al abrir la caja. ¿Qué pasó con el resultado que no vemos? Los seguidores de la interpretación de la pluralidad de mundos de la mecánica cuántica creen que hay una explicación clara y sencilla para ello. Sostienen que entonces se dan dos realidades paralelas y que en cada una de ellas ocurre cada una de las opciones. Lo que encontramos al abrir la caja solo evidencia en qué realidad existimos nosotros.

Otros físicos, que no están dispuestos a aceptar la idea de una posible infinidad de realidades paralelas, han propuesto una serie de interpretaciones alternativas que exigen la existencia de una realidad objetiva incluso cuando no se toma una medida, pero todas ellas contienen algún aspecto extraño de la realidad escondido en alguna parte. Por ejemplo, otra forma de interpretar la teoría cuántica fue la desarrollada por primera vez por el físico francés Louis de Broglie en la década de 1920 y perfeccionada varias décadas después por David Bohm. De acuerdo con esta interpretación, el mundo cuántico se compone de partículas guiadas por ondas. Sus propiedades son desconocidas para nosotros (y se denominan «*variables ocultas*»), pero describen un mundo cuántico sin la granularidad de la concepción estándar de Copenhague de la realidad. En lugar de ser el propio electrón el que exhibe propiedades de onda o de partícula dependiendo de cómo se mida, se admite la existencia tanto de ondas como de partículas, aunque lo único que detectamos nosotros en todo momento son las partículas. Un conjunto reducido, pero entregado, de físicos de todo el mundo considera que esto, que se conoce como teoría De Broglie-Bohm, tiene mucho que ofrecer, pero sigue siendo una opción muy poco estudiada dentro del corpus de interpretaciones cuánticas.

Aunque el debate es fascinante, debo dejarlo aquí, puesto que hay muchos otros libros que lo abordan con más profundidad que

yo en este breve espacio. En cualquier caso, dejo sin aclarar el problema de la interpretación de la mecánica cuántica porque es ahí donde nos encontramos en este momento.

Como hasta ahora me he centrado en los elementos constitutivos esenciales de la materia y la energía, en el espacio-tiempo en el que estos existen y en la naturaleza cuántica de la realidad que subyace a todo ello, he pasado por alto algunos conceptos igual de fundamentales de la física que aparecen cuando confluyen grandes cantidades de partículas para formar sistemas complejos. Así que dejemos atrás, por ahora, el mundo de lo muy pequeño y volvamos a ampliar la perspectiva para analizar qué pasa cuando aparece la complejidad y para explorar ideas tan esenciales como el orden, el caos, la entropía y la flecha del tiempo.

6. La termodinámica y la flecha del tiempo

En cuanto dejamos atrás el mundo cuántico con su aleatoriedad e incertidumbre, el mundo newtoniano al que estamos habituados reaparece con nitidez. La humeante taza de café que removemos sobre la mesa, la pelota que acaba llegando al jardín desde la casa contigua o el avión a reacción que vuela muy alto sobre nuestra cabeza se componen, si lo pensamos, de materia y energía que conforman sistemas con niveles diversos de complejidad. Por tanto, para entender la física del mundo que vemos a nuestro alrededor, debemos entender cómo interaccionan y se comportan las partículas en grandes cantidades. La rama de la física que nos ayuda a entender el comportamiento de grandes cantidades de cuerpos en interacción se denomina mecánica estadística.

También convendría recordar que cuando abordamos la materia y la energía en el capítulo 4 concluimos que la energía puede cambiar de una forma a otra siempre y cuando la cantidad total de energía dentro del sistema permanezca constante. La energía de una pelota botando cambia constantemente entre la energía potencial del objeto en sí, debida a su altura sobre el suelo, y la energía cinética de su movimiento. En el momento más alto del rebote toda ella se encuentra en forma de energía potencial, y justo antes de que el balón choque contra el suelo, cuando alcanza la rapidez máxima, la energía potencial se habrá transformado en energía cinética. Todo esto suena bastante obvio, pero también sabemos que la pelota no seguirá botando eternamente: pierde energía en forma de calor, por el rozamiento con el aire y los golpes contra el suelo. Esta transformación de la energía cinética en calor presenta una diferencia fundamental con la transformación de la energía cinética en energía potencial porque es un proceso de una sola dirección. Nos quedaríamos atónitos si la pelota volviera a botar de repente sin ninguna ayuda externa.

¿Por qué pasa esto? ¿A qué se debe esta «direccionalidad única»?

La respuesta es que el balón deja de botar por la misma razón por la que el calor siempre fluye de la taza caliente de café hacia el aire circundante más frío y nunca al revés, y por la que el azúcar y la leche del café nunca se «desdisuelven» ni se «desmezclan». Le doy la bienvenida al mundo de la termodinámica, el tercer pilar de la física (junto con la relatividad general y la mecánica cuántica). Si la mecánica estadística describe cómo interaccionan y cómo se comportan grandes cantidades de partículas dentro de un sistema, la termodinámica describe el calor y la energía del sistema y los cambios que experimentan con el paso del tiempo. Como veremos, estas disciplinas de estudio están muy interconectadas, por lo que suelen estudiarse juntas. También nosotros las abordaremos a la vez.

La mecánica estadística y la termodinámica

Imagine una caja llena de aire en cuyo interior las moléculas rebotan aleatoriamente. Algunas se mueven deprisa, mientras que otras lo hacen más lentas. Pero si la caja se mantiene a una temperatura y una presión fijas, entonces la cantidad total de energía que contiene permanecerá constante. Esta energía se distribuye entre las moléculas de una forma muy particular: la energía total disponible se reparte de acuerdo con una regla estadística simple. Suponga que introducimos un poco de aire caliente en la caja (moléculas con un movimiento más rápido) y esperamos: la energía de estas nuevas moléculas se distribuirá entre las más frías que ya había desde un principio a través de colisiones aleatorias. Las moléculas calientes se frenarán al mismo tiempo que harán que otras se muevan más rápido. Al cabo de un tiempo el aire volverá a estabilizarse con un nuevo equilibrio. Ahora la energía más probable de cada molécula será ligeramente mayor que antes, y la temperatura global de la caja habrá subido un tanto.

La forma en que se reparte la energía entre las moléculas dentro de la caja se denomina distribución de Maxwell-Boltzmann en honor a dos de los científicos más eminentes del siglo XIX, quienes desarrollaron la disciplina de la mecánica estadística. El término

distribución alude a la forma de la curva en una gráfica que conecta las velocidades variables de las moléculas con la cantidad de ellas que portan de cada velocidad. O, dicho de otra manera, es la línea que une puntos correspondientes a la probabilidad de que una molécula tenga una velocidad dada. Siempre habrá una velocidad específica más probable para las moléculas, que se corresponde con el punto más elevado de la curva, de manera que cualquier velocidad mayor o menor que esta será siempre menos probable, y el patrón de la distribución cambia a medida que aumenta la temperatura dentro de la caja, de tal forma que el pico de probabilidad de la distribución se desplaza hacia velocidades más altas. Cuando las moléculas se estabilizan en una distribución de Maxwell-Boltzmann se dice que el aire de la caja ha alcanzado el equilibrio termodinámico.

La tendencia a un estado estadístico de equilibrio se asocia con un concepto muy importante de la física denominado entropía. La entropía de un sistema siempre aumenta si no se interviene en él: es decir, todo sistema se relaja siempre de un estado «especial» (ordenado) a otro «menos especial» (mezclado). Los sistemas físicos se desenrollan, se enfrían y se desgastan. Esto se conoce como la segunda ley de la termodinámica y en el fondo no es más que una declaración de la inevitabilidad estadística: si nada interviene, todo acaba recuperando siempre un estado de equilibrio.

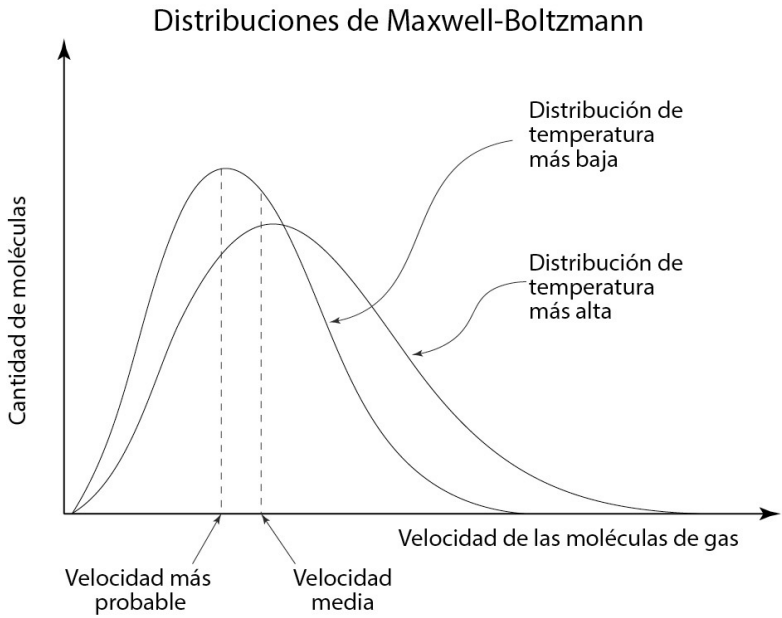

Figura 2. Distribución de Maxwell-Boltzmann: las moléculas de gas que hay dentro de una caja acabarán repartidas por todo el espacio y compartirán entre ellas su energía hasta alcanzar el equilibrio térmico. La curva resultante que representa la cantidad de moléculas frente a su velocidad se conoce como distribución de Maxwell-Boltzmann y alcanza su máximo en la velocidad más probable. Este pico se desplaza hacia velocidades más altas cuando aumenta la temperatura global del gas. Nótese que la velocidad más probable no es igual que la velocidad media, ya que hay más partículas con velocidades superiores al valor del pico de la curva que inferiores.

Imagine que todas las moléculas de aire que hay dentro de la caja estuvieron concentradas en una esquina en un primer momento. La entropía de la caja en aquel momento inicial sería baja, puesto que su contenido se encontraba en un estado especial, más ordenado. Si nada interviene, el movimiento aleatorio de las moléculas las repartirá con rapidez hasta que ocupen toda la caja y su distribución alcance el equilibrio. Igual que la velocidad a la que se mueven las moléculas calientes las acaba estabilizando en un estado de equilibrio termodinámico, el aire de la caja pasa de un estado de entropía baja a otro de entropía alta a medida que las moléculas se dispersan. Cuando las moléculas de aire se encuentran

al fin repartidas por toda la caja, la entropía es máxima.

Consideremos este otro ejemplo más simple aún. Si una baraja de cartas está ordenada por palos y cada uno de estos lo está por orden ascendente, se dice que tiene entropía baja. Se encuentra en un estado muy ordenado que se perderá al barajar el mazo, por lo que diremos que la entropía aumenta. Si seguimos barajando será mucho más probable que las cartas se desordenen más en lugar de recuperar su ordenada distribución inicial. Esto se debe a que la baraja del principio tenía las cartas en un orden muy particular, mientras que las cartas pueden desordenarse de muchas maneras. Por tanto, es mucho más probable que la mezcla de los naipes vaya en una dirección, del orden al desorden, o sea, de una entropía baja a una entropía alta.

Una definición más interesante de entropía la contempla como una medida de la capacidad de algo para invertir energía en la ejecución de un trabajo. Cuando un sistema alcanza el equilibrio, se vuelve inútil. Una pila con plena carga tiene poca entropía, pero esta irá en aumento a medida que se use la batería. Una pila descargada se encuentra en equilibrio y tiene una entropía elevada. Aquí es donde aparece la distinción entre energía útil y energía residual. Cuando un sistema está ordenado y en un estado especial (entropía baja), se puede usar para realizar un trabajo útil (como ocurre con una pila cargada, un reloj con cuerda, la luz del Sol o los enlaces químicos entre átomos de carbono en un trozo de carbón). Pero cuando el sistema alcanza el equilibrio, la entropía es máxima y la energía que contiene resulta inútil. Por tanto, en cierto sentido, lo que se necesita para que el mundo funcione no es energía, sino una entropía baja. Si todo estuviera en un estado de equilibrio, no ocurriría nada. Necesitamos que un sistema se encuentre en un estado de entropía baja, lejos del equilibrio, para forzar que la energía cambie de una forma a otra, en otras palabras, para que realice un trabajo.

Solo estando vivos ya consumimos energía, pero ahora vemos que debe tratarse de energía útil, de la que tiene poca entropía. La vida es un ejemplo de un sistema capaz de mantenerse en un estado de entropía reducida, apartado del equilibrio térmico. En el fondo, una célula viva es un sistema complejo que se alimenta (a través de miles de procesos químicos) de energía útil, con entropía baja, que

extrae de la estructura molecular de la comida que ingerimos. Esta energía química se emplea para mantener en marcha los procesos de la vida. En última instancia la vida en la Tierra solo es posible porque se «nutre» de la energía con entropía baja del Sol.

La segunda ley de la termodinámica y el avance implacable de la entropía rigen también en todo el universo. Imagine que nuestra caja de aire es ahora una nube fría de gas del tamaño de una galaxia. Si el movimiento aleatorio de un conjunto de moléculas de gas las concentra más que la media, entonces la debilísima atracción gravitatoria mutua puede bastar para apretarlas más entre sí y formar una concentración de gas más densa que la media [25]. Cuantas más moléculas de gas se amontonen, más efectiva será la gravedad para atraer más moléculas. Este proceso de acumulación gravitatoria fue el que causó la formación de las estrellas: inmensas nubes de gas se concentraron hasta alcanzar la densidad suficiente para que comenzara la fusión termonuclear (de hidrógeno en helio) y para que prendieran las estrellas. Tal vez sorprenda la primera vez que se piensa en ello, porque el proceso de la concentración parece dar lugar a un estado más organizado, más ordenado y más «especial» y, por tanto, el estado final debería tener menos entropía que cuando todas las moléculas se encuentran uniformemente dispersas. Entonces ¿es que la gravitación reduce la entropía y viola la segunda ley de la termodinámica?

La respuesta es no. Siempre que la materia forma concentraciones gravitatorias su entropía aumenta, por la misma razón por la que la entropía de un balón aumenta cuando rueda colina abajo debido al tirón de la gravedad terrestre. Imagine esta concentración como la suelta de un muelle estirado o como un reloj al que se le va acabando la cuerda: la entropía crece a medida que pierden la capacidad de realizar trabajo útil. Por tanto, cuando las moléculas de gas situadas en cierta parte de la nube se juntan más entre sí, momentáneamente y por casualidad, que cuando estaban uniformemente repartidas por el espacio, ese estado representa una pérdida pasajera del máximo de entropía. Para que la entropía vuelva a aumentar y cumpla la segunda ley de la termodinámica, estas moléculas solo pueden hacer una de estas dos cosas: o bien se vuelven a separar para recuperar el estado original de equilibrio térmico, o pueden hacer lo contrario y concentrarse debido a la

atracción gravitatoria mutua. En cualquiera de esos dos casos la entropía aumenta.

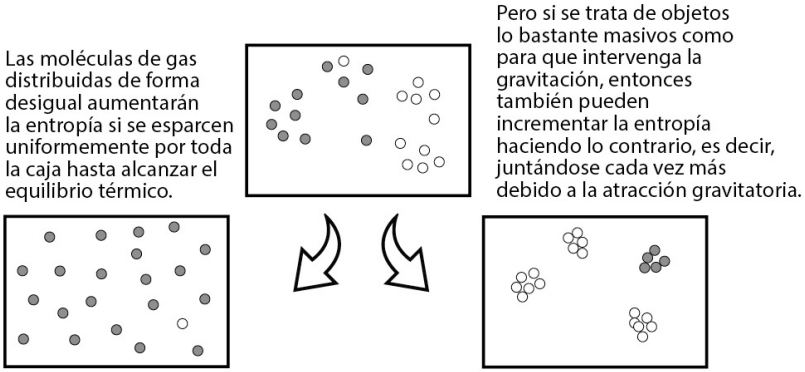

Figura 3. Aumento de la entropía: las partículas dentro de una caja que están ligeramente fuera de equilibrio (entropía baja) pueden aumentar la entropía, o bien redistribuyéndose para recuperar el equilibrio, o bien concentrándose debido a la gravedad. En cualquiera de estos casos incrementan la entropía y satisfacen la segunda ley de la termodinámica.

Y usted se preguntará: ¿qué causaría en un primer momento esa pérdida de la entropía máxima? ¿No violaría esa causa de por sí la segunda ley? La respuesta es que la materia y la energía del universo no partieron de un estado de equilibrio térmico, sino de un estado muy especial de entropía baja determinado por las condiciones de la propia Gran Explosión. A un nivel cuántico, estas condiciones iniciales sembraron el espacio-tiempo de irregularidades que se volvieron enormes dentro del tejido cósmico a medida que el universo se iba expandiendo, de tal modo que dieron lugar a la aparición automática de cierta cantidad de grumos en la distribución de la materia. A medida que el universo seguía «desplegándose», la materia lo bastante próxima entre sí para notar el tirón gravitatorio acabó por concentrarse y formar estrellas y galaxias. Las moléculas de gas hidrógeno y helio del espacio se congregaron en los pozos gravitatorios de las estrellas y con ello causaron un incremento de la entropía. Pero un detalle crucial es que esa entropía no alcanzó su máximo (las estrellas no son sistemas en equilibrio térmico), sino que quedaron reservorios de baja entropía, de tal modo que las reacciones de fusión

termonuclear que se producían en su seno liberaban el exceso de energía en forma de luz y de calor. Esta energía de entropía baja procedente de nuestra estrella, el Sol, es la que permite la vida en la Tierra. Las plantas la emplean durante la fotosíntesis para crear biomasa y almacenan energía útil de entropía reducida en los enlaces moleculares de sus compuestos orgánicos, los cuales quedan así a disposición de otras criaturas vivas, incluido el ser humano, que se alimentan de plantas.

También la Tierra cuenta con un almacén propio de energía útil que, junto con la energía del Sol, determina el clima, mientras que la energía gravitatoria de la Luna y el Sol controla las mareas de los océanos, todo lo cual nos proporciona reservas útiles de entropía baja que podemos aprovechar. Por ejemplo, el agua situada en las alturas de una catarata cae debido al tirón gravitatorio, de modo que su energía potencial se convierte en energía cinética, la cual podemos utilizar para propulsar centrales hidroeléctricas que generan electricidad. Por supuesto, siempre se producirá alguna pérdida de eficiencia, ya que la segunda ley exige algún aumento global de la entropía en forma de calor residual.

Pero hay algo mucho más fundamental en todo esto que la mera transformación de una forma de energía en otra.

La dirección del tiempo

Si un sistema físico (incluido el conjunto del universo) siempre tiene que moverse desde un estado ordenado de entropía baja hacia un estado desordenado de entropía alta, y esto determina una dirección en el devenir del propio tiempo: la segunda ley de la termodinámica permite diferenciar entre pasado y futuro. Tal vez suene algo extraño porque, al fin y al cabo, no necesitamos que la segunda ley nos diga que ayer fue un tiempo pasado. Guardamos el recuerdo de lo que sucedió ese día en el cerebro, aunque los hechos se hayan ido para siempre. En cambio, no sabemos qué ocurrirá mañana, aún está por llegar. Esta flecha del tiempo que apunta desde el pasado hacia el futuro es, a nuestro parecer, una propiedad de la realidad intuitivamente más fundamental que la segunda ley de la termodinámica. Pero lo cierto es que es al revés: hay que considerar la segunda ley de la termodinámica como el *origen* de la

flecha del tiempo. Sin esta ley no habría futuro ni pasado.

Imagine que ve una película con lo que sucede dentro de nuestra caja llena de aire (e imagine que las moléculas son lo bastante grandes como para distinguirlas a simple vista). Estarán rebotando por todas partes contra las paredes de la caja y contra otras moléculas de aire, unas más rápidas y otras más lentas. Pero si el aire está en equilibrio térmico, entonces no seremos capaces de decir si la película discurre hacia delante o hacia atrás. A la escala de las colisiones moleculares no logramos distinguir una direccionalidad en el tiempo. Sin un incremento de la entropía y una tendencia al equilibrio, todos los procesos del universo pueden ocurrir igual de bien a la inversa. Sin embargo, tal como hemos visto, esta tendencia del universo, y de todo lo que contiene, a desplegarse hacia un equilibrio térmico se debe por completo a que la probabilidad estadística de los sucesos a un nivel molecular va desde algo con menos probabilidad de que ocurra hacia algo más probable, de acuerdo con las leyes de la termodinámica. La direccionalidad del tiempo que apunta del pasado al futuro no es ningún misterio; es solo una cuestión de inevitabilidad estadística.

Teniendo esto en mente ya no nos resulta tan extraño ni tan siquiera el hecho de que conozcamos el pasado pero no el futuro. A medida que percibo el mundo que me rodea, acumulo más información en el cerebro, un proceso que, debido al trabajo que realiza el cerebro, produce calor residual y hace crecer la entropía del cuerpo. Desde un punto de vista termodinámico, hasta la mismísima capacidad que tenemos para distinguir entre el pasado y el futuro se debe tan solo a que el cerebro está sujeto a la segunda ley.

Determinismo y aleatoriedad

Puede que las ideas recién expuestas incomoden al lector, y es razonable. Sin duda la diferencia entre el pasado y el futuro es algo más que la mera tendencia estadística de moléculas en colisión aleatoria hacia el equilibrio, o que la diferencia entre un mazo de cartas ordenado o barajado. Al fin y al cabo, el pasado es algo fijo (solo recordamos una sucesión de acontecimientos: una única historia). En cambio, el futuro se abre ante nosotros con infinitas

posibilidades[26]. La mayoría de lo que ocurrirá mañana será inesperado, y mi jornada podría desarrollarse de miles de formas distintas, dependiendo de la confluencia de millones de factores diversos. Entonces, ¿hay verdaderamente una diferencia entre el pasado y el futuro a un nivel más profundo que la simple estadística, basada en la idea de que tenemos un solo pasado pero muchos futuros posibles? Dicho de otro modo, ¿está escrito nuestro destino o depende el futuro del azar? ¿Es el futuro algo inamovible o está aún por decidir? Se trata de viejas preguntas filosóficas que atañen a la naturaleza misma del libre albedrío.

Cuando en física se dice que un proceso es «determinista», solemos referirnos al concepto del determinismo «causal»: la idea de que los sucesos pasados producen los sucesos futuros. Pero si así fuera no quedaría nada sujeto al azar y todo lo que acontece ocurriría por una razón, por lo que pasó justo antes: la causa y el efecto. Por tanto, el estado de todo el universo en el momento presente podría rastrearse, en principio, hacia atrás en el tiempo, paso a paso, hasta llegar a la Gran Explosión. Y, si esto es cierto, entonces es indudable que los sucesos del presente determinarán el futuro, de tal forma que, *en principio*, deberíamos poder predecir el futuro. Y el término *sucesos* incluye en este caso la activación en el cerebro de las neuronas que definen los procesos del pensamiento y, por tanto, las decisiones que tomamos. Al fin y al cabo, también el cerebro está hecho de átomos. Ningún ingrediente adicional lo exime de cumplir las leyes de la física.

En un universo en el que todo está predeterminado no hay posibilidad de elegir con libertad nuestros actos y decisiones, puesto que solo hay una versión del futuro, igual que solo hay una versión del pasado. (Recuerde que en el capítulo 3 abordamos la idea einsteiniana del universo de bloque). Pero el orden de los acontecimientos, que el pasado da lugar al futuro y no al revés, se rige por la segunda ley de la termodinámica, sin la cual los sucesos que etiquetamos como «futuros» tendrían la misma probabilidad de haber causado los hechos «pasados».

Pero si fuera este el caso, ¿cómo es que no podemos predecir el futuro con ningún grado de certidumbre? Al fin y al cabo, ni tan siquiera las supercomputadoras más potentes pueden decirnos con seguridad si lloverá la semana que viene. En el caso del tiempo

atmosférico la razón está clara. Si consideramos la gran complejidad de los modelos que hay que desarrollar y la cantidad de variables que hay que conocer con absoluta precisión (desde variaciones de temperatura en la atmósfera y los océanos hasta la presión del aire, la dirección y velocidad del viento, la actividad solar, etc.) para emitir un pronóstico preciso, se ve que la tarea se complica más cuanto más lejana sea la predicción futura que queremos emitir. Por tanto, aunque los meteorólogos pronostican con seguridad si mañana hará sol o si estará cubierto, es imposible que sepan si el año que viene lloverá en esta misma fecha. Un dato crucial es que esto no significa que esa información no pueda conocerse, *en principio* (ya que en un universo determinista el futuro ya está predispuesto), sino tan solo que, en la práctica, habría que conocer las condiciones actuales del clima en la Tierra con una precisión apabullante y contar con computadoras de una potencia descomunal para introducir en ellas todos los datos y obtener una simulación precisa cuyo desarrollo matemático arrojara una predicción fiable.

Esta *impredecibilidad* caótica es lo que da origen al famoso «efecto mariposa»: la idea de que la alteración del aire minúscula y aparentemente irrelevante causada por el aleteo de una mariposa en un extremo del mundo podría evolucionar y crecer poco a poco hasta tener unos efectos espectaculares en la progresión de un huracán en el otro lado del mundo. Esto no significa que haya una mariposa en particular que se pueda rastrear como causante del huracán, sino que cualquier cambio minúsculo en las condiciones iniciales puede dar lugar a resultados muy diversos si el sistema sigue evolucionando con el paso del tiempo.

Las ecuaciones de la física describen un mundo en evolución determinista. Si se conocen las condiciones iniciales exactas de un sistema (dónde se encuentra cada partícula constitutiva y cómo se mueve en un instante temporal concreto, y qué fuerzas actúan sobre todas las partículas que lo componen) se puede calcular la evolución del sistema con un *determinismo perfecto*. Causa y efecto. En teoría, el futuro podría desplegarse ante nuestra vista.

El problema, por supuesto, es que en la práctica nunca lo conseguimos. Esta incapacidad para conocer o controlar las condiciones iniciales de un sistema, así como el resto de influencias

continuas, con una precisión infinita se aprecia incluso en sistemas mucho más simples que la meteorología. El lanzamiento de una moneda al aire no se puede repetir con exactitud para obtener el mismo resultado una y otra vez. Si lanzo una moneda al aire y sale cara, me resultará muy difícil repetir el lanzamiento para que la moneda dé la misma cantidad de giros y yo tenga la seguridad de que volverá a salir cara una vez más. En un universo determinista como el nuestro, el destino está completamente trazado, pero somos incapaces de predecirlo con alguna fiabilidad.

Pero ¿qué pasa con la mecánica cuántica? ¿No es ahí donde intervienen a un nivel fundamental la verdadera aleatoriedad y el indeterminismo? ¿No nos rescata la mecánica cuántica del sombrío determinismo de un futuro preestablecido, fijo, en el que tenemos la impresión de que ya no tomamos decisiones libres, sino que somos meros engranajes de un universo ordenado como un mecanismo de relojería? Lo cierto es que aún no tenemos una respuesta clara para esta pregunta. También hay que prestar atención para diferenciar entre lo impredecible y lo indeterminado. Bien es cierto que la naturaleza probabilística del mundo cuántico implica que los sucesos son *impredecibles*: que no se puede saber de antemano en qué lugar exacto estará un electrón o en qué dirección gira o en que instante preciso se desintegrará un átomo radiactivo. Lo único que podemos hacer en mecánica cuántica es asignar probabilidades a los resultados de cada medición. Sin embargo, aunque esta impredecibilidad *pueda* deberse a un verdadero indeterminismo, las matemáticas de la teoría cuántica no exigen que sea así. El indeterminismo es una interpretación que le imponemos a las matemáticas para describir lo que medimos. Por ejemplo, la mayoría de cosmólogos defiende la interpretación de la pluralidad de mundos de la mecánica cuántica en la que todo es completamente determinista.

Pero la impredecibilidad y la aleatoriedad irrumpen en la física también de otra manera: a través del fenómeno del comportamiento caótico. El caos aparece en la naturaleza cuando hay una inestabilidad dentro de un sistema, de tal modo que esos cambios minúsculos en el devenir del sistema con el paso del tiempo pueden aumentar con rapidez. Nos hallamos de nuevo ante el efecto mariposa. A veces hasta los sistemas simples siguen leyes físicas

simples, deterministas, que se pueden comportar de formas tan impredecibles y complejas que parecen verdaderamente aleatorias. Pero a diferencia de lo que sucede en el mundo cuántico, donde no sabemos si la impredecibilidad se debe a un indeterminismo real o no[27], la impredecibilidad de un sistema caótico no se debe a una verdadera aleatoriedad, a pesar de las apariencias iniciales.

La teoría del caos también cuenta con una cara B fascinante: que la aplicación reiterada de unas reglas simples puede conducir a un comportamiento aparentemente aleatorio, pero a veces genera preciosas estructuras y patrones complejos de comportamiento con un aspecto muy ordenado. Surge una complejidad inesperada donde antes no había nada sin que en ningún momento se viole la segunda ley de la termodinámica. La rama de la ciencia que se ocupa de esta clase de comportamiento emergente se conoce como ciencia de los sistemas complejos y está empezando a tener un peso importante en muchos campos de investigación, como la biología, la economía y la inteligencia artificial.

En resumen, por tanto, bien podría ser que nuestro universo fuera en verdad completamente determinista, y que toda impredecibilidad sobre su evolución futura se deba enteramente a las deficiencias de nuestra capacidad para saber con seguridad qué ocurrirá después. Esto podría deberse, o bien a que a un nivel cuántico no se puede observar el estado de un sistema sin alterarlo y modificar el resultado, o bien a que en la práctica nunca conocemos un sistema *por completo*, y la aparición de incertidumbres significa que nunca podemos estar seguros de qué deparará el futuro.

¿Y qué es el tiempo, entonces?

Tras esta ojeada veloz al determinismo y la aleatoriedad en física, retomemos una vez más el tema central de este capítulo: el sentido de avance del tiempo que emerge de la termodinámica. Nótese que ahora nos encontramos ante tres perspectivas *diferentes* sobre qué es el tiempo, cada una de ellas procedente de uno de los tres pilares de la física.

En primer lugar, de acuerdo con la relatividad especial, el

tiempo no es absoluto; no transcurre con independencia de los sucesos que tienen lugar en el espacio tridimensional, sino que debe combinarse con el espacio en un espacio-tiempo tetradimensional. Esto no es un mero truco matemático, nos viene impuesto por las propiedades del mundo real, comprobado una y otra vez mediante experimentos que revelan que el universo es así. La teoría de la gravitación de Einstein (la relatividad general) añade que el espacio-tiempo es de por sí el campo gravitatorio, de forma que cuanto más intenso sea el campo, más se curva el espacio-tiempo. Por tanto, la lección que enseña la relatividad es que el tiempo forma parte del entramado físico del universo, una dimensión susceptible de estirarse y deformarse con la gravedad.

Esto dista mucho del papel casi irrelevante que desempeña el tiempo dentro de la mecánica cuántica, donde no es nada más que un parámetro, es decir, un número que se introduce en una ecuación. Conocer el estado de un sistema en un instante temporal dado t_1 permite calcular el estado del sistema en cualquier otro momento, t_2, y así sucesivamente. Y también funciona a la inversa: si se conoce el estado de un sistema en algún momento ulterior t_2, se puede calcular cómo era en un momento anterior t_1. La flecha del tiempo dentro de la mecánica cuántica es reversible.

En termodinámica el tiempo cobra otro significado más. Aquí no es un parámetro ni una dimensión, sino una flecha irreversible que apunta del pasado al futuro, en la dirección en la que crece la entropía.

Muchos físicos creen que algún día lograremos fundir estas tres concepciones diferentes del tiempo. Por ejemplo, aún no hemos oído la última palabra sobre mecánica cuántica, puesto que aún no entendemos del todo cómo se relacionan las ecuaciones deterministas que describen la dinámica de un estado cuántico (y en qué momento puede fluir en cualquier dirección) con el proceso irreversible, en una sola dirección, de la medida. Hay indicios sólidos procedentes de la teoría de la información cuántica (una disciplina que avanza veloz) que apuntan a que la forma en que los sistemas cuánticos interaccionan y se entrelazan con el entorno se asemeja al modo en que un objeto caliente cede calor a los alrededores más fríos. Esto permitiría unir la mecánica cuántica con la termodinámica.

Un experimento excelente realizado en la Universidad de Queensland, Australia, en 2018 evidenció lo curioso que es todo esto al demostrar que a un nivel cuántico los hechos se suceden sin un orden causal definido. Básicamente en física la causalidad implica que si un acontecimiento A se produce antes que un suceso B (dentro de algún marco de referencia); entonces A puede influir, o incluso causar, o no el suceso B. Pero este último no podría haber influido o causado el acontecimiento A. A un nivel cuántico esta causalidad lógica se ha revelado inexistente. Esto ha animado a algunos científicos a afirmar que la flecha del tiempo no existe en realidad a un nivel cuántico, sino que se trata tan solo de una propiedad que aparece cuando ampliamos el foco a una macroescala.

Sin embargo, el intento de unir los dos primeros pilares de la física ha sido lo que ha ocupado las mentes de tantos físicos a lo largo de todo un siglo. Se han dedicado carreras profesionales enteras a desentrañar cómo conectar la mecánica cuántica y la relatividad general en una teoría de la gravitación cuántica que lo abarque todo. Esta unificación de las dos ideas más importantes de la física del siglo XX constituye el tema del próximo capítulo.

7. La unificación

La necesidad imperiosa de los físicos de unificar sus teorías, de fundir todas las leyes del universo y encapsularlas dentro de una sola ecuación matemática impecable (una «teoría del todo»), se revela a menudo como una mera obsesión por lo simple y lo compacto, un empeño por compactar la complejidad de todos los fenómenos naturales usando la menor cantidad de principios fundamentales. Lo cierto es que se trata de algo más sutil que eso. Durante toda la historia de la física, cuanto más hemos ido descubriendo sobre el funcionamiento de la naturaleza, más relaciones hemos detectado entre fuerzas y partículas sin conexión aparente entre ellas, y menos reglas y principios hemos necesitado para explicar una variedad cada vez mayor de fenómenos. La unificación no es algo a lo que aspiremos de forma deliberada; ha surgido como resultado de un conocimiento cada vez más profundo del mundo físico. Pero es innegable que este logro conlleva cierto atractivo estético que nos anima a continuar en la misma línea. Y eso nos ha deparado éxitos asombrosos.

Desde una perspectiva matemática, el intento de unificar las leyes de la física ha implicado con frecuencia una búsqueda de simetrías abstractas, patrones que ocultan verdades fundamentales sobre la naturaleza. En el capítulo 2 ya vimos lo importante que se ha revelado la simetría dentro de la física y su papel a la hora de inferir leyes como la de la conservación de la energía y la cantidad de movimiento. Pero me temo que este breve volumen no permitirá apreciar de verdad su importancia y el papel que han desempeñado las distintas simetrías dentro de la física teórica a lo largo del siglo pasado.

La búsqueda de una teoría unificada se describe en ocasiones como un intento de reunir todas las fuerzas de la naturaleza dentro de un mismo paradigma, lo que sugiere la existencia de una sola

«superfuerza» y que las distintas interacciones que conocemos dentro de la naturaleza (electromagnetismo, gravitación y dos fuerzas de corto alcance confinadas en los núcleos atómicos) constituyen diferentes aspectos de esta fuerza única. Hasta ahora la comunidad de físicos ha cosechado numerosos éxitos con este gran proyecto de la unificación. Ya he comentado que Newton entendió que lo que hace que la manzana caiga del árbol es la misma fuerza universal (la gravitación) que controla el movimiento de los cuerpos celestes por el firmamento. Esto no era nada obvio en aquella época, aunque sí nos lo parezca hoy. Antes de Newton se creía que los objetos caen al suelo porque todo «tiende» a ir hacia su sitio «natural» (hacia el centro del mundo), y que el movimiento del Sol, la Luna, los planetas y las estrellas se regía por principios muy diferentes. La ley de la gravitación universal de Newton aúna todos estos fenómenos al sostener que todas las masas se atraen entre sí con una fuerza proporcional al producto de sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Da igual si se trata de una manzana o de la Luna; la misma fórmula rige la atracción de ambas hacia la Tierra.

Otro avance inmenso en el camino hacia la unificación tuvo lugar casi dos siglos después de Newton, cuando James Clerk Maxwell evidenció que la electricidad y el magnetismo son en realidad distintas facetas de la misma fuerza electromagnética. De modo que la atracción electrostática que se produce entre un trocito de papel y un globo frotado contra la ropa tiene su origen en la misma fuerza electromagnética que atrae un clip de papelería hacia un imán. Casi todos los fenómenos observados en la naturaleza se deben en última instancia a una de estas dos fuerzas: la gravitación y el electromagnetismo. Por tanto, era natural plantearse si se puede ir más allá para unirlas en una teoría conjunta.

Ya hemos visto que a un nivel fundamental el campo gravitatorio no es más que la forma en sí del espacio-tiempo, una revelación que también resultó de una idea unificada. Al combinar el espacio con el tiempo, Einstein desveló una verdad profunda: que solo en un espacio-tiempo tetradimensional pueden coincidir todos los observadores en cuanto a la separación entre dos eventos (con independencia de lo rápido que se muevan unos en relación con los otros). Una década después su teoría general de la relatividad

brindó al mundo una visión nueva y más precisa de cómo la masa y la energía curvan este espacio-tiempo. Pero a Einstein no le pareció suficiente con eso y dedicó la mayor parte de las cuatro décadas siguientes de su vida a la búsqueda infructuosa de una teoría unificada que fundiera su teoría de la gravitación con la teoría electromagnética de Maxwell.

Ahora sabemos que, además de la gravitación y el electromagnetismo, hay otras dos fuerzas (las fuerzas nucleares fuerte y débil) que solo actúan a distancias insignificantes, pero que son igual de importantes para las leyes fundamentales de la naturaleza. Y el siguiente paso adelante en la física del siglo XX consistió en la unificación de la fuerza electromagnética con una de esas dos fuerzas nucleares.

Pero este progreso importante para comprender la naturaleza de las fuerzas fundamentales solo llegó cuando la mecánica cuántica pasó de ser una teoría que describe el microcosmos en términos de partículas y ondas a convertirse en una teoría relacionada con campos. En el capítulo 3 hablé muy por encima sobre el significado de los campos dentro del contexto de la gravitación y el electromagnetismo. Ahora ya estamos preparados para ahondar en el significado de campo cuántico.

Teoría cuántica de campos

Tal vez haya transmitido la impresión de que una vez completada la mecánica cuántica casi cien años atrás, la mayoría de la comunidad de físicos se dedicó a aplicarla a problemas reales dentro de la física y la química, dejando a las mentes más filosóficas la explicación del significado de todo ello. En gran medida esta versión de la historia es cierta. Pero también es verdad que la mecánica cuántica siguió creciendo en sofisticación a lo largo de la primera mitad del siglo pasado. El formalismo matemático básico (las ecuaciones y los principios) se establecieron ya a finales de la década de 1920, pero Paul Dirac consiguió enlazar bien pronto la teoría cuántica con la teoría especial de la relatividad de Einstein. Asimismo fundió la mecánica cuántica con la teoría de campos electromagnéticos de Maxwell para crear la primerísima teoría cuántica de campos, la cual evolucionó hasta convertirse en una descripción eficaz y muy

precisa de la interacción electromagnética de la materia con la luz a un nivel cuántico.

La teoría cuántica de campos de Dirac describe cómo emiten y absorben fotones los electrones, y que dos electrones se repelen entre sí no porque alguna fuerza invisible los conecte a través del espacio, sino mediante el intercambio de fotones. En la década de 1930 se esfumó la distinción a un nivel cuántico entre la física de partículas y la física de campos. Así, igual que los fotones son la manifestación corpuscular del campo electromagnético (paquetes de energía pura a una escala cuántica), también las partículas localizadas de materia, como los electrones y cuarks, no son más que manifestaciones de sus campos cuánticos asociados más fundamentales. Sin embargo, a diferencia de los fotones y el campo electromagnético, esto no resulta tan obvio con partículas de materia. La razón es que los fotones pueden apiñarse en cantidades ilimitadas y dar lugar a lo que percibimos como un campo electromagnético a una macroescala, mientras que las partículas de materia, como los electrones y los cuarks, son menos sociables debido a una de las reglas de la mecánica cuántica llamada principio de exclusión de Pauli, la cual establece que no es posible que dos partículas de materia idénticas ocupen el mismo estado cuántico. Y esto conlleva que no percibamos sus campos cuánticos con tanta facilidad.

A finales de la década de 1940 se resolvieron al fin los problemas matemáticos relacionados con la descripción de campos cuánticos y con ello se completó la llamada teoría de la electrodinámica cuántica (también conocida como QED, acrónimo en inglés de *quantum electrodynamics*). Hasta el momento presente se considera la teoría más precisa de toda la ciencia. También es la teoría física que explica a un nivel fundamental casi todo lo que conforma el mundo que nos rodea, puesto que sirve de base a toda la química y a la naturaleza de la materia (desde cómo funcionan los circuitos electrónicos y microchips de mi ordenador portátil hasta cómo se activan las neuronas del cerebro para mandar a los dedos la orden de que tecleen este texto). Esto es así porque la electrodinámica cuántica ocupa el centro de todas las interacciones entre átomos.

Y, sin embargo, a pesar de su potencial, la electrodinámica

cuántica solo describe *una* de las cuatro fuerzas de la naturaleza: el electromagnetismo.

Entre finales de la década de 1950 y toda la década de 1960 se usaron bellos, aunque complejos, razonamientos matemáticos para fundir la electrodinámica cuántica con una teoría de campos de la fuerza nuclear débil. Se comprobó que la interacción débil también surge, a un nivel fundamental, de un intercambio de partículas equivalente al intercambio de fotones para describir la fuerza electromagnética. Hoy tenemos una teoría unificada que describe una única interacción «electrodébil» que, a través de un proceso denominado ruptura de la simetría, se separa en dos fuerzas físicas diferenciadas: el electromagnetismo (que se manifiesta mediante el intercambio de fotones) y la fuerza débil, transportada por el intercambio de bosones W y Z, descubiertos con posterioridad en el CERN en 1983 y estudiados con profusión desde entonces. La separación entre ambas fuerzas (la ruptura de la simetría) se debe a otro campo denominado campo de Higgs, que confiere masa a las partículas W y Z mientras deja sin masa al fotón. Esta unificación implica que, a un nivel fundamental, las cuatro fuerzas de la naturaleza se reducen tan solo a tres: la fuerza electrodébil, la fuerza nuclear fuerte y la gravitación (que, en cualquier caso, no es una verdadera fuerza en realidad, según la relatividad general). Tal vez no esté usted de acuerdo conmigo en que esto simplificara las cosas.

Al mismo tiempo que se produjo este avance, se desarrolló otra teoría cuántica de campos para describir la fuerza nuclear fuerte que mantiene unidos los cuarks en el interior de protones y neutrones. Una sutileza de la fuerza nuclear fuerte es que su actuación entre los cuarks implica una propiedad denominada «carga de color» que merece una mención breve aquí. Igual que las partículas sujetas a la fuerza electromagnética tienen dos clases de carga eléctrica que llamamos sencillamente positiva y negativa [28], las partículas que se ven afectadas por la fuerza fuerte (cuarks) poseen tres tipos de «carga» de color, así llamada para diferenciarla de la carga eléctrica. Nótese que el término *color* no debe interpretarse aquí en absoluto de un modo literal. Se necesitaron tres tipos de carga de color, en lugar de solo dos (como con la carga eléctrica), para explicar por qué los protones y neutrones tienen que

contener tres cuarks; y la analogía con el color se eligió por su relación con la forma en que se combinan tres colores diferentes de la luz (rojo, azul y verde) para dar lugar a la luz blanca. De ahí que cada uno de los tres cuarks alojados en el interior de un protón o de un neutrón porte una carga de color diferente: roja, azul o verde, las cuales se combinan para generar una partícula que debe resultar «incolora».

La regla dice que los cuarks no pueden existir por sí solos porque tienen color; solo pueden existir en la naturaleza si se agrupan entre sí formando combinaciones incoloras[29]. Por esta razón la teoría cuántica de campos de la fuerza nuclear fuerte que une cuarks acabó conociéndose como cromodinámica cuántica o QCD (acrónimo inglés de *quantum chromodynamics*). Las partículas que se intercambian los cuarks son los gluones, bautizados con un nombre más evocador y apropiado, estará de acuerdo conmigo, que las partículas portadoras de la fuerza débil, los bosones W y Z.

Recopilemos. De las cuatro fuerzas de la naturaleza que se conocen, tres se describen mediante teorías cuánticas de campos. La fuerza electromagnética y la fuerza nuclear débil están conectadas por la teoría electrodébil, mientras que la fuerza nuclear fuerte se describe a través de la cromodinámica cuántica. La teoría aún en desarrollo que conecta estas tres fuerzas entre sí se conoce como la gran teoría unificada o GUT (por las siglas de su nombre en inglés *grand unified theory*). Pero hasta que la tengamos, debemos conformarnos con una unión laxa de la teoría electrodébil y la cromodinámica cuántica que se conoce como el modelo estándar de la física de partículas.

Hasta sus defensores más entusiastas admitirán que el modelo estándar seguramente no es la última palabra sobre esta materia. Ha sobrevivido hasta ahora en parte porque no hay nada mejor para reemplazarlo, y en parte porque sus predicciones se han confirmado hasta ahora mediante experimentos, como el descubrimiento del bosón de Higgs en 2012 (al que volveremos más adelante). Y, sin embargo, a pesar de ser esta la mejor descripción disponible de tres de las cuatro fuerzas de la naturaleza, nada complacería más al mundo de la física que lograr algún descubrimiento nuevo que contradiga el modelo estándar, porque eso daría esperanzas de

encontrar una descripción más profunda y exacta de la realidad. Pero, mientras las predicciones del modelo estándar se sigan confirmando con experimentos, tendremos que seguir peleando.

Por supuesto, todo este debate sobre teorías cuánticas de campos omite un ingrediente trascendental: la gravitación.

En busca de una gravitación cuántica

Hemos descubierto que la descripción del mundo cotidiano en las escalas de longitud, tiempo y energías adecuadas a la física newtoniana no es más que una aproximación, y que debajo de ella hay teorías físicas más fundamentales que se manifiestan a escalas extremas. Por un lado tenemos la teoría cuántica de campos, que nos ha llevado al modelo estándar de la física de partículas y que da cuenta de tres de las cuatro fuerzas conocidas en el universo. En el otro extremo tenemos la teoría general de la relatividad, que nos brinda el modelo estándar de la cosmología que engloba la otra fuerza, la gravitación. Este modelo estándar de las cosas muy grandes recibe gran variedad de nombres, como modelo de concordancia de la Gran Explosión o modelo lambda-materia oscura fría (ΛCDM) o modelo cosmológico de la Gran Explosión, y lo abordaremos con más profundidad en el próximo capítulo.

Por tanto, una pregunta que se suele formular a los físicos es por qué consideran tan importante, o incluso si sería posible, continuar con esta obsesión por la unificación, por intentar fundir esos dos modelos para describir todas las escalas que existen: el mundo cuántico y el mundo cósmico. Es indudable que cada uno de ellos funciona bien en su terreno, y eso debería bastarnos. Pero una vez más debo insistir en que el objeto de la física no se limita a constatar lo que observamos o encontrar alguna aplicación útil basada en ello; la física consiste en entender la realidad de la forma más profunda y completa posible.

Así que aquí es donde estamos en este momento, atascados con dos paradigmas válidos: la teoría cuántica de campos y la relatividad general, que no parecen querer encajar entre sí. De hecho, parecen tener muy poco en común: sus estructuras matemáticas son incompatibles. Y sin embargo, no es posible que la historia se acabe aquí. Sabemos que el espacio-tiempo reacciona

ante la materia que hay en él. También sabemos que la materia a una escala subatómica se comporta de acuerdo con las leyes de la mecánica cuántica, lo que a su vez tiene que repercutir en el comportamiento del espacio-tiempo. Si un electrón no observado se encuentra en una superposición cuántica que lo mantiene en dos o más estados al mismo tiempo, tal como sabemos que puede ocurrir con los electrones (por ejemplo, si su estado cuántico se encuentra disperso por algún volumen del espacio o en una superposición de diferentes energías a la vez), entonces es indudable que el espacio-tiempo que hay alrededor de ese electrón tiene que reflejar también esa borrosidad. El problema es que la relatividad general sencillamente *no está* «cuantizada», y no tenemos nada claro cómo podríamos cuantizarla. Uno de los problemas que se derivan de esto es que las partículas subatómicas tienen masas tan diminutas que sus efectos sobre el espacio-tiempo son prácticamente imposibles de medir.

Aun así, el problema continúa: ¿cómo cuantizamos el campo gravitatorio? ¿Qué hay que hacer para combinar la teoría cuántica de campos con la relatividad general? Y si en verdad son tan incompatibles como parece, entonces ¿a cuál de estas dos teorías increíblemente válidas debemos «dar preferencia» para llegar a una gravitación cuántica?

Teoría de cuerdas

A mediados de la década de 1980 se propuso una candidata a teoría de la gravitación cuántica. Se basaba en una idea matemática llamada supersimetría que mencioné por encima en el capítulo 2. Esta teoría acabó conociéndose como teoría de supercuerdas y cautivó la imaginación de muchos físicos matemáticos de mi generación. La supersimetría propone una relación entre las dos clases principales de partículas fundamentales del modelo estándar: las partículas de materia o fermiones (cuarks y electrones y sus allegados) y las partículas portadoras de fuerza o bosones (fotones, gluones y bosones W y Z).

La teoría de cuerdas se propuso por primera vez a finales de la década de 1960 como teoría de la fuerza nuclear fuerte, pero cuando se desarrolló la cromodinámica cuántica en la década de

1970 y se comprobó su eficacia, la teoría de cuerdas cayó en desgracia y dejó de considerarse necesaria. No obstante, pronto se vio que al incorporar la idea de la supersimetría en la teoría de cuerdas podía recuperarse como candidata para una misión mucho más grandiosa que una teoría de la fuerza nuclear fuerte: una teoría del todo.

La premisa básica de la teoría de cuerdas supersimétrica (o de supercuerdas) es que una manera de unificar todas las fuerzas consiste en añadir más dimensiones al espacio aparte de las tres que conocemos. Esta idea se remonta al trabajo del físico teórico polaco Theodor Kaluza, quien justo después del fin de la Primera Guerra Mundial reparó en que si resolvía las ecuaciones de campo de la relatividad general de Einstein en un espacio-tiempo pentadimensional, en lugar de tetradimensional, entonces el electromagnetismo emergía de las matemáticas en forma de vibraciones en esta quinta dimensión invisible. Kaluza mostró su trabajo a Einstein, a quien le gustó en un principio. Parecía conseguir con el electromagnetismo lo que Einstein había logrado con la gravitación: que su descripción fundamental pasara de ser una fuerza física a ser pura geometría.

Sin embargo, a pesar de esta forma elegante de unificar la luz (el electromagnetismo) y la gravitación (la relatividad general), la mayoría de físicos, incluido el propio Einstein, manifestó pronto su escepticismo sobre el trabajo de Kaluza, puesto que no había ningún indicio experimental que sugiriera la existencia de esta dimensión espacial adicional.

Unos años después de la idea original de Kaluza, el físico sueco Oskar Klein planteó que la quinta dimensión está oculta porque está enroscada sobre sí misma y, por tanto, es demasiado diminuta para detectarla. Hay una analogía estándar que ayuda a explicar lo que esto significa. Desde cierta distancia una manguera parece una línea de una sola dimensión, pero si nos acercamos vemos que en realidad se trata de una superficie bidimensional enroscada alrededor de un cilindro. La segunda dimensión espacial (la dirección que da la vuelta en torno a la manguera) era demasiado pequeña para verse de lejos. Klein sugirió que lo mismo se aplicaba a la quinta dimensión espacial de Kaluza, la cual se encontraba enroscada en un círculo de una milmillonésima de billonésima del

tamaño de un átomo. Aunque la teoría de Kaluza-Klein no condujo a la unificación de la gravitación y el electromagnetismo, sí ayudó a comprender la importancia de otras dimensiones en la teoría de supercuerdas. Ahora, en cambio, en lugar de necesitar una sola dimensión espacial oculta, tenía que haber seis, todas ellas enroscadas en una bola hexadimensional (6 dimensiones) imposible de visualizar. Por tanto, la teoría de supercuerdas establece que hay diez dimensiones: cuatro de espacio-tiempo que percibimos más las seis dimensiones ocultas.

En este momento hay muchos investigadores dedicados a unificar las fuerzas de la naturaleza que aún trabajan en teoría de cuerdas. Sostienen que hemos llegado tan lejos porque hemos usado ideas válidas, como la teoría cuántica de campos y la supersimetría, para comprender tres de las cuatro fuerzas; de modo que seguramente la gravitación también se podrá domar. Bien podrían estar en lo cierto.

La teoría de cuerdas comienza con las propiedades de la materia del espacio-tiempo que contempla la mecánica cuántica. La idea central es que todas las partículas elementales puntuales son en realidad cuerdas diminutas que vibran en las dimensiones ocultas. Estas cuerdas serían mucho más pequeñas que las escalas confirmadas en la actualidad por la física de partículas y, por tanto, solo podemos percibirlas como partículas puntuales. El problema que surgió en la década de 1990 fue que parecía haber cinco versiones *diferentes* de la teoría de cuerdas, y nadie sabía cuál era la correcta. De modo que se propuso un paradigma más grandioso que unificara las cinco versiones bajo un solo paraguas. Este paradigma englobador de todo se denomina ahora teoría M, y es una teoría de supersimetría con once dimensiones en lugar de diez. Sin embargo, una vez más parecía necesitarse otra dimensión oculta para facilitar el plan de la gran unificación.

Entonces ¿lo tenemos? ¿Es la teoría M nuestra «teoría del todo» definitiva? Por desgracia, aún no lo sabemos. Aunque las matemáticas son elegantes y sólidas, todavía no sabemos si la teoría de cuerdas o la teoría M son la descripción correcta de la realidad. En el próximo capítulo comentaré algunos de los problemas y controversias más notables en relación con este asunto. En cualquier caso, a la teoría M le ha salido un digno rival en la

carrera por la unificación. Esta teoría competidora es igual de especulativa, pero cierto número de especialistas en física teórica la consideran una forma más pura y más cabal de abordar la unificación. Recibe el nombre de gravitación cuántica de lazos, y saltó a la palestra en la última década del siglo XX.

Gravitación cuántica de lazos

La gravitación cuántica de lazos no parte de la teoría cuántica de campos, sino del otro extremo, de la relatividad general. Asume que el concepto más fundamental es el espacio-tiempo de por sí, en lugar de la materia que contiene. Desde un punto de vista estético parecería razonable intentar cuantizar el campo gravitatorio, el cual, de acuerdo con la relatividad general, *es* el propio espacio-tiempo. Por tanto, si nos encogiéramos hasta una escala de longitud lo bastante reducida, deberíamos ver que el espacio se torna granulado y discreto. Del mismo modo que Max Planck propuso en 1900 que la radiación térmica llega en última instancia en paquetes cuánticos, la cuantización del espacio sugiere que debería haber una longitud mínima que ya no se pueda dividir más. Sin embargo, los cuantos de la energía gravitatoria son los cuantos del espacio en sí, lo que significa que no existen como paquetes *dentro* del espacio… sino que *son* paquetes de espacio.

Se cree que la unidad más pequeña de espacio (un cuanto de volumen) mide 1 longitud de Planck, o 10^{-35} m, de ancho. Siempre he disfrutado buscando formas de describir cómo es este volumen tan minúsculo. Por ejemplo, un núcleo atómico contiene tantos volúmenes de Planck en su interior como metros cúbicos hay en nuestra Galaxia.

Esta discretización del espacio parece inevitable si queremos cuantizar el campo gravitatorio. Y de ello se deriva que el tiempo también tiene que ser «granulado». Por tanto, la continuidad que percibimos en el espacio y el tiempo no es más que una aproximación a gran escala de los cuantos discretos de la gravitación, porque cada uno de los píxeles del espacio-tiempo es demasiado pequeño para notarlo.

La gravitación cuántica de lazos contrasta enormemente con la

teoría de cuerdas, la cual predice que, igual que las tres fuerzas comprendidas en el modelo estándar (electromagnetismo y las fuerzas nucleares fuerte y débil) son en realidad campos cuánticos que se manifiestan como partículas portadoras de fuerza, lo mismo sucede con el campo gravitatorio mediado por una partícula cuántica de gravitación: el gravitón, que sería el estado sin masa de una cuerda. En la teoría de cuerdas, este cuanto del campo gravitatorio existe *dentro* del espacio-tiempo, mientras que en la gravitación cuántica de lazos es el propio espacio-tiempo lo que está cuantizado.

La gravitación cuántica de lazos alude a las rutas cerradas que nos llevan desde un cuanto del espacio, a través de sus enlaces con cuantos adyacentes, a recorrer el rizo de un lazo y de vuelta al punto de partida. La naturaleza de estos bucles determina la curvatura del espacio-tiempo. No son entidades físicas como las cuerdas. Lo único real es la relación entre los lazos.

En cierto sentido, la gravitación cuántica de lazos tiene un alcance modesto. Pero si la consideramos con más atención, empezamos a reparar en que, si fuera la descripción correcta de la realidad, entonces no es tanto que ocurran acontecimientos en el espacio durante un tiempo determinado, sino que el universo y todo lo que hay en él (toda la materia y energía) no son más que campos cuánticos coexistentes y superpuestos entre sí. Y estos campos no necesitan un espacio y un tiempo en los que existir, puesto que el espacio-tiempo es de por sí *uno* de esos campos cuánticos.

Los caminos de la unificación

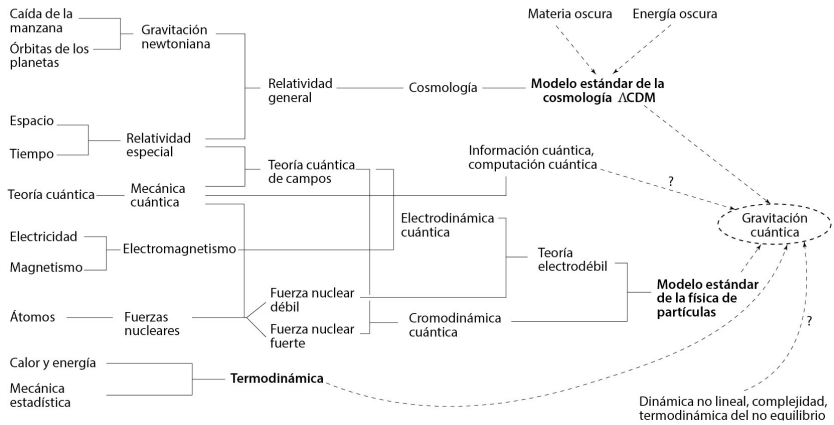

Figura 4. Esquema (simplificado) de la confluencia de los conceptos físicos (teorías, fenómenos, fuerzas) con el paso de los años. Nótese que, aunque la cronología es correcta (va de izquierda a derecha), no hay que extraer demasiadas conclusiones de ella. Por ejemplo, la relatividad especial aparece justo debajo de la gravitación newtoniana aunque llegó varios siglos después.

En resumen, aún no podemos afirmar que dispongamos de una verdadera teoría del todo, ni sabemos cómo combinar la mecánica cuántica con la relatividad general. Lo que tenemos son teorías candidatas que parecen prometedoras, pero que aún dejan muchas preguntas sin responder. Físicos brillantes han basado toda su carrera en una de estas teorías, pero igual que sucede con las diferentes interpretaciones de la mecánica cuántica, hay mucha sociología de la ciencia implicada, y las consideraciones sobre qué teoría se revela más prometedora dependen de con quién se hable. Por tanto, en líneas generales tenemos por un lado la teoría de cuerdas, que es el mejor intento actual para unificar las cuatro fuerzas de la naturaleza, pero que, a pesar de contar con tres décadas y media de investigación, sigue siendo muy especulativa. Algunos físicos sostienen que a pesar de los avances logrados está llegando a una especie de crisis porque no ha cumplido su primera promesa. De hecho, cabe afirmar que ni tan siquiera es una teoría científica propiamente dicha, puesto que aún no ha emitido predicciones comprobables. Luego, en el otro extremo, tenemos la gravitación cuántica de lazos, que parece la forma más lógica de cuantizar el espacio-tiempo, pero que no revela cómo relacionar después la gravitación con las otras tres fuerzas. Nadie sabe si uno de estos dos enfoques es el correcto ni si deberíamos fundir ambos de alguna manera, ni tan siquiera si deberíamos buscar una teoría completamente nueva.

Esto nos conduce de forma natural hasta los problemas y controversias más sobresalientes de la física fundamental actual y a los avances más probables que depararán las décadas venideras.

8. El futuro de la física

El éxito notable de la física del siglo XX podría instar a pensar que lo único que queda por hacer es planchar algunas arrugas, refinar las mediciones experimentales y dar los últimos retoques a las teorías matemáticas, o sea, que la mayoría de lo que hay que saber ya se conoce y que solo faltan por poner algunos puntos sobre las íes y el remate final. Tal vez tenga usted la impresión de que no necesitamos que llegue otro Newton o Einstein (o incluso un Maxwell, Rutherford, Bohr, Dirac, Feynman, Witten o Hawking) que provoque una nueva revolución dentro de la física, porque ya estamos a punto de alcanzar una teoría del todo que explique el funcionamiento del universo en su conjunto.

Por desgracia, o por suerte si es usted especialista en física en los albores de su carrera profesional y busca grandes problemas a los que dedicarse, la verdad dista mucho de esto. Yo diría que en realidad hoy estamos más lejos de cerrar la física de lo que pensábamos veinte o treinta años atrás. Admitimos que el modelo estándar describe todos los elementos constitutivos esenciales de la materia y la energía, pero ahora estamos muy seguros de que todo lo descubierto constituye tan solo el 5 % de lo que compone el universo. El otro 95 %, conocido como materia oscura y energía oscura, sigue siendo un misterio en cierta medida. Estamos seguros de su existencia, pero no sabemos qué son ni cómo encajan en las teorías actuales. En este capítulo profundizaré en este enigma y en otros desafíos notables para la física fundamental.

La materia oscura

La velocidad de giro de las galaxias, el movimiento de galaxias enteras en el interior de cúmulos de galaxias y la estructura a gran

escala del universo en su conjunto indican que hay un componente del universo que consiste en materia casi invisible. La llamamos «oscura» no porque esté oculta detrás de otra materia visible, ni tan siquiera porque sea realmente oscura, sino porque, hasta donde sabemos, no se ve afectada por la fuerza electromagnética y, por tanto, no emite luz ni interacciona con la materia normal, salvo en términos gravitatorios[30], así que sería más adecuado denominarla «materia invisible». Piense por un instante por qué al golpear una mesa con la mano no la traspasamos hasta el otro lado. Tal vez la respuesta le parezca trivial: sin duda se debe a que tanto la mano como la mesa son de un material sólido. Pero no olvide que, a escala atómica, la materia se compone en su mayoría de espacio vacío (nubes difusas de electrones alrededor de un núcleo minúsculo) y, por tanto, debería haber mucho espacio para que los átomos que componen la mano traspasaran con facilidad los átomos de la mesa sin entrar en contacto con ninguna otra materia física. La razón de que no podamos hacerlo radica en la fuerza electromagnética que actúa entre los electrones de los átomos de la mano y los electrones de los átomos de la mesa, los cuales se repelen entre sí y oponen la resistencia que percibimos como algo sólido. Sin embargo, si la mano estuviera hecha de materia oscura, entonces atravesaría la mesa como si esta no estuviera ahí; la fuerza gravitatoria entre ellas sería demasiado débil para ejercer un gran efecto.

Se sabe desde hace mucho tiempo que las galaxias tienen mucha más masa de la que cabe atribuirles a partir de la suma de toda la materia normal que contienen en forma de estrellas, planetas y polvo y gas interestelares. En cierto momento se pensó que la materia oscura podía consistir en estrellas y agujeros negros extintos mucho tiempo atrás, objetos hechos de materia normal, pero que no emiten luz. Sin embargo, numerosos indicios apuntan ahora a que esta materia invisible tiene que consistir en un tipo desconocido de materia, muy probablemente en un tipo de partícula que no se ha descubierto aún.

En un principio se propuso la materia oscura para explicar la dinámica a gran escala de cúmulos enteros de galaxias. Después llegaron indicios de ella a partir de la manera en que se desplazan las estrellas dentro de las galaxias espirales, donde circulan como

gránulos sin disolver sobre la superficie de una taza de café instantáneo recién removido. La mayoría de las estrellas (y, por tanto, pensará usted, la mayoría de la masa) de una galaxia se concentra en su núcleo, lo que exigiría que las que se encuentran en el borde exterior giren más despacio alrededor de su centro. Las velocidades orbitales observadas en estas estrellas son superiores a lo esperado, lo que apunta a que tiene que haber alguna otra materia no detectada que se extiende más allá que la materia visible, aporta una cohesión gravitatoria extra e impide que las estrellas del extrarradio salgan despedidas al exterior de la galaxia.

La materia oscura también se manifiesta en la forma en que se curva el espacio a su alrededor. Este fenómeno se observa en la desviación que experimenta la luz en su recorrido desde objetos muy distantes hasta nuestros telescopios. La intensidad de esa desviación solo se puede explicar si el espacio tiene una curvatura gravitatoria adicional debida a la materia oscura que hay en las galaxias, la cual tiene que atravesar la luz antes de llegar a nosotros.

Entonces ¿qué sabemos sobre la materia oscura aparte de que aporta esta atracción gravitatoria adicional y necesaria? ¿No podría atribuirse esto a algo menos exótico que una forma desconocida de materia? En realidad, algunos astrofísicos sostienen que quizá no haya ninguna necesidad de recurrir a la materia oscura… si se modifican las propiedades de la fuerza gravitatoria a larga distancia. Una de estas propuestas la constituye la hipótesis conocida como MOND (del inglés *modified Newtonian dynamics*, «dinámica newtoniana modificada») y, a primera vista, puede resultar muy atractiva. Sin embargo, aunque MOND y otras propuestas similares para modificar la relatividad general esclarecen algunos de los efectos observados, hay muchos otros que no logran explicar. Ninguno de estos modelos se ha podido conciliar con los datos observados en cúmulos de galaxias, sobre todo cúmulos de galaxias en colisión (como el famoso cúmulo Bala), en la estructura detallada de la radiación del fondo cósmico de microondas, en los cúmulos globulares de estrellas o, en tiempos más recientes, en las minúsculas galaxias enanas.

La materia oscura también parece necesaria para explicar la estructura del universo temprano. A diferencia de la materia

normal, que a través de su interacción con el campo electromagnético mantenía su energía elevada, la materia oscura se enfriaba más rápido a medida que se iba expandiendo el universo y, por tanto, empezó antes su concentración gravitatoria. Uno de los resultados más importantes de la astrofísica de los últimos años ha consistido en el empleo de sofisticadas simulaciones por computadora de la formación de galaxias para confirmar que solo se puede explicar el universo real si contiene grandes cantidades de materia oscura. Sin ella no tendríamos las ricas estructuras cósmicas que observamos hoy. En otras palabras, sin la materia oscura no podría haberse formado jamás la mayoría de las galaxias y, por tanto, estrellas y planetas. Esta conclusión relevante está bellamente respaldada por datos que revelan fluctuaciones sutiles en la temperatura del espacio profundo, la huella que dejó el universo primigenio en la radiación del fondo cósmico de microondas. A finales de la década de 1970 ya se admitía que, aunque estas fluctuaciones en el fondo cósmico de microondas contribuirían a gestar la distribución actual de la materia en el universo, eran demasiado insignificantes para explicar cómo se formaron las galaxias. La materia oscura aportaría la concentración adicional necesaria. Este fue uno de los grandes logros científicos de finales del siglo XX, cuando el satélite COBE[31] midió que esas fluctuaciones eran justo las previstas. Desde entonces ha habido otras misiones espaciales que se han dedicado a cartografiar estas rugosidades en el fondo cósmico de microondas con una resolución cada vez mayor: la misión WMAP de la NASA en la primera década del presente siglo y, después, el satélite Planck de la Agencia Espacial Europea, lanzado en 2009.

Aunque quedan pocas dudas sobre la existencia de la materia oscura, seguimos en tinieblas en cuanto a su composición. Dentro de la astrofísica resulta muy frustrante que a la vez que se acumulan indicios en favor de la materia oscura, no hayamos logrado descubrir qué es en realidad. El consenso actual es que consiste en una clase desconocida de partícula pesada (es decir, pesada para los estándares de las partículas fundamentales), y la mayoría de los esfuerzos experimentales se han centrado hasta ahora en la construcción de sofisticados detectores subterráneos capaces de captar sucesos extremadamente raros cuando alguna de esas

partículas de materia oscura procedente del espacio choque de frente con un átomo dentro del detector. Hasta ahora no se ha detectado ninguna señal en esos experimentos cada vez más sofisticados y sensibles.

Y, sin embargo, los especialistas que persiguen la materia oscura son optimistas. Lo más probable, dicen, es que se dé en forma de partículas de movimiento lento y que consista en lo que conoce como «materia oscura fría». Y no hay pocas propuestas sobre qué podrían ser esas partículas, algunas de ellas con nombres tan sonoros como axiones, neutrinos estériles, WIMP [32] y GIMP [33]. Muchos están convencidos de que pronto habrá pruebas experimentales. Pero lo cierto es que ya llevamos un tiempo diciendo eso.

Llegados a este punto me veo en la obligación de dedicar unas palabras a los neutrinos, que durante un tiempo fueron los principales candidatos a materia oscura. Se trata de partículas esquivas pero abundantes, que sabemos que existen, que tienen una masa minúscula y son casi indetectables. Necesitaríamos un escudo de plomo de un año-luz de grosor para tener siquiera un 50 % de probabilidad de bloquearlos. A todos los efectos cabría afirmar que son «materia oscura». Sin embargo, no pueden encarnar la materia oscura que estamos buscando porque, dada su ligereza, viajan casi a la velocidad de la luz, demasiado deprisa para quedarse pegados a las galaxias y, por tanto, para explicar las propiedades anómalas de estos objetos. Los neutrinos se consideran materia oscura caliente debido a su movimiento veloz.

Y por si el problema pendiente de la materia oscura no fuera suficiente para la comunidad de físicos, ahora sabemos que hay otra sustancia misteriosa que cubre todo el universo y que condiciona su forma de un modo crucial.

La energía oscura

En 1998 el estudio de la tenue luz de las supernovas situadas en galaxias distantes se utilizó para calcular la velocidad a la que se alejan de nosotros esas galaxias debido a la expansión del universo. Se descubrió que se alejan más despacio de lo que sugería su distancia. Como la luz que nos llega desde esas galaxias salió de

ellas cuando el universo tenía muy poca edad, esas velocidades de recesión inferiores a lo esperado indicaban que el universo tuvo que expandirse más despacio en el pasado. Por tanto, la atracción gravitatoria acumulada de toda la materia que hay en el universo (tanto normal como oscura) no está frenando la expansión, sino que tiene que estar interviniendo algo más que haga que se expanda más rápido ahora que en el pasado.

Esta misteriosa sustancia de repulsión que actúa en contra de la gravedad y que expande el espacio cada vez más deprisa se conoce como energía oscura. De acuerdo con los conocimientos actuales, la energía oscura podría dar lugar con el tiempo a lo que se denomina la «muerte térmica» del universo, dentro de muchos miles de millones de años, si el espacio sigue expandiéndose cada vez más rápido y enfriándose a medida que se estabiliza en un estado de equilibrio termodinámico. Pero hasta que desentrañemos la verdadera naturaleza de la energía oscura, y, de hecho, las propiedades del universo primigenio (véase el siguiente apartado), no deberíamos apresurarnos a conjeturar cuál será su destino final. Queda mucho para eso, y ¡podría suceder cualquier cosa de ahora a entonces!

Hasta hace unos años yo habría afirmado que sabemos menos sobre energía oscura que sobre materia oscura, pero las cosas están cambiando. Las ecuaciones de la relatividad general de Einstein incluyen una cantidad denominada constante cosmológica (representada mediante una lambda griega mayúscula: Λ) que concuerda con ella a la perfección. Lo más probable es que lo que llamamos energía oscura sea la energía del propio espacio vacío, lo que se denomina vacío cuántico. Ya hemos visto que todo se reduce en última instancia a campos cuánticos. Todas las partículas diversas que componen la materia y la energía, ya sean cuarks, electrones, fotones o bosones de Higgs, se pueden considerar meras *excitaciones* localizadas de esos campos cuánticos (como olas sobre la superficie del océano). Sin embargo, si se eliminaran todas las partículas de un volumen de espacio, el campo no desaparecería. Decimos que se queda en su estado fundamental o de vacío, pero en todo momento seguirá habiendo partículas virtuales emergiendo y desapareciendo de la existencia dentro de ese vacío, tomando prestada la energía de su entorno para existir, pero devolviéndola

con la misma rapidez en cuanto desaparecen de nuevo. Por tanto, decir que el vacío cuántico del espacio vacío tiene energía cero sería como afirmar que un océano en calma no tiene profundidad. El equivalente al agua situada bajo la superficie oceánica es la energía oscura, es la constante cosmológica.

Aun así, contar con un símbolo matemático para representar la energía oscura no significa que conozcamos por completo su naturaleza. Las mediciones astronómicas sugieren que la constante cosmológica tiene cierto valor numérico, pero, igual que sucede con la masa del bosón de Higgs en el modelo estándar, no sabemos por qué tiene ese valor. Este viejo enigma de la física se conoce como el problema del «ajuste fino» y es muy poco satisfactorio. En realidad las cosas son todavía peores. La discrepancia entre la energía de vacío calculada por la teoría cuántica de campos y la energía de vacío observada en las mediciones cosmológicas es tan inmensa que constituye uno de los problemas más embarazosos que quedan por resolver en física. La situación es tan ridícula que el valor calculado supera en 120 órdenes de magnitud al valor observado.

Nuestra mejor propuesta de modelo cosmológico (el equivalente al modelo estándar de la física de partículas) reúne bajo su paraguas lo que se sabe en la actualidad sobre materia oscura y energía oscura, y se denomina modelo lambda-materia oscura fría (ΛCDM). De igual modo que las teorías cuánticas de campos más profundas apuntalan la laxa alianza del modelo estándar de la física de partículas, la relatividad general sirve de base al modelo cosmológico ΛCDM.

Falta todavía un ingrediente más importante del modelo ΛCDM que la mayoría de físicos, aunque en absoluto todos ellos, considera necesario para explicar las propiedades del universo que vemos. Recibe el nombre de inflación cósmica y aporta una posible respuesta a la eterna pregunta de cómo comenzó a existir en un primer momento el universo y toda la materia y la energía que contiene.

La inflación y el multiverso

Tal como dijimos al comienzo de este libro, desde los albores de la historia de la humanidad hemos inventado muchos mitos sobre los

orígenes del universo. En la actualidad la física nos ha brindado una explicación desmitificada de cómo empezó el universo, respaldada por numerosos indicios observacionales. Pero ¿tuvo alguna causa la Gran Explosión de por sí? ¿Hubo algo que desencadenó el nacimiento de nuestro universo en primer término?

La respuesta más simple es que no hubo nada «antes» de la Gran Explosión, porque ella marcó el comienzo del espacio y el tiempo. Una idea que impulsaron Stephen Hawking y James Hartle, llamada propuesta de la ausencia de frontera o del universo sin frontera, establece que, a medida que damos marcha atrás al reloj y nos acercamos cada vez más a la Gran Explosión, el tiempo empieza a perder su significado y se convierte más bien en una dimensión del espacio. Así que en cierto instante del origen del universo acabamos llegando a un espacio tetradimensional uniforme. Por tanto, no tiene sentido preguntarse qué ocurrió antes de la Gran Explosión, de la misma manera que es absurdo plantearse qué hay al sur del polo sur terrestre.

Pero el modelo de la Gran Explosión no basta por sí solo para explicar el universo que observamos hoy. En particular hay dos problemas que desconcertaron a los especialistas medio siglo atrás. El primero se conoce como el problema de la planitud. Se trata de otra cuestión relacionada con el ajuste fino y tiene que ver con la densidad de la materia y la energía en el universo, la cual parece tener justo el valor necesario para que el universo sea casi perfectamente plano[34]. El segundo problema recibe el nombre de problema del horizonte. Lo más lejano que alcanzamos a divisar del espacio probablemente sea tan solo una fracción minúscula de todo el universo y, por tanto, existe un horizonte más allá del cual nunca conseguiremos ver. Este horizonte marca el límite de lo que se conoce como universo visible. Existe porque el universo no está ahí desde siempre, y la luz tarda un tiempo en llegar hasta nosotros. Una dificultad añadida es que el universo se está expandiendo y que, a cierta distancia, el espacio se estira más deprisa que lo que tarda la luz en atravesarlo (es como intentar subir por una escalera mecánica que baja con rapidez).

Imaginemos una galaxia situada cerca de la frontera del universo visible en una dirección y otra galaxia situada cerca del borde en la dirección opuesta. Como el universo se expande,

cualquier ser inteligente que resida en una de estas galaxias distantes ignorará por completo la existencia de la otra galaxia, ya que la luz procedente de ella aún no le habrá llegado ni lo hará jamás. De hecho, las regiones del espacio que contienen cada una de estas galaxias nunca han podido estar en contacto y nunca han podido compartir información. ¿Por qué plantea esto un problema? Porque al mirar en cualquier dirección hasta los confines donde alcanzamos a ver, el universo presenta siempre el mismo aspecto. Esas dos galaxias lejanas se muestran muy semejantes (a nosotros que estamos entre ambas) en cuanto a propiedades físicas, composición y estructura de la materia que hay entre ellas. ¿Cómo es posible, si nunca estuvieron en contacto en el pasado?

Para resolver estas dos cuestiones (el problema de la planitud y el problema del horizonte) hace cuarenta años se propuso un concepto que se conoce como inflación cósmica. El planteamiento era: cuando el universo no tenía más de una fracción de segundo de existencia experimentó un breve periodo de expansión exponencial causada por otro campo cuántico denominado inflatón, durante el cual creció con una rapidez extraordinaria hasta volverse un billón de billón de billón de billón de veces más grande que antes. Esto resuelve el problema del ajuste fino de la densidad que dio lugar al espacio-tiempo plano que observamos hoy, porque cualquier curvatura insignificante habría quedado aplanada por la inflación.

La forma en que la inflación resuelve el problema del horizonte es más interesante. La explicación habitual es que las partes distantes del universo que no parecen haber tenido nunca la posibilidad de estar en contacto, y por tanto de sincronizar sus propiedades físicas, estuvieron en contacto en realidad al principio, solo que la inflación expandió tan rápido el espacio que ahora parecen estar demasiado apartadas para haber mantenido alguna vez una conexión causal.

Como he dicho, esta es la «explicación habitual», pero si lo pensamos bien hay dos cosas que no encajan del todo al identificar la inflación con una expansión «veloz». En primer lugar, para que partes distantes del universo se pudieran comunicar entre sí cuando se encontraban próximas, se necesitaría, sin duda, que pasaran más tiempo cerca una de otra, en lugar de separarse demasiado pronto. En segundo lugar, cuando en matemáticas se dice que algo es

exponencial se alude a que cambia despacio en un principio y después se acelera (la pendiente se va volviendo más inclinada). Esta es una forma más atinada de imaginar el universo temprano inflacionario. Empezó con una expansión lenta y después se aceleró. Después, en algún momento, esta expansión exponencial se convirtió en lo que se denomina una expansión de «ley de potencias», hasta que empezó a actuar la energía oscura a mitad de la vida del universo y empezó a acelerar de nuevo la expansión.

Desde luego, esto no evidencia en absoluto por qué se trata de una idea tan atractiva ni por qué o cómo funciona. Así que dediquemos unos instantes a desentrañar su significado.

Para apreciar cómo actúa la inflación hay que entender en primer lugar la diferencia entre presión positiva y negativa. Imagine que tengo un globo inflado. El aire que hay dentro ejerce presión contra la superficie interior empujando hacia fuera. Si apretara el globo con ambas manos gastaría energía en comprimir el aire en un volumen más pequeño, lo que aumentaría su densidad, y esa energía quedaría almacenada en las moléculas de aire del globo. Imagine ahora el proceso inverso: imagine que separo las manos y que el globo recupera su tamaño inicial, por lo que el aire del interior vuelve a perder densidad. La energía almacenada en sus moléculas también debe descender hasta sus niveles originales[35]. Por tanto, si el volumen dentro del globo se expande, su energía disminuye. Esto es lo que sucede con la presión positiva «normal»: pierde energía al expandirse.

Pero ¿y si el globo estuviera lleno de una sustancia inusual que hiciera lo contrario? ¿Y si al aumentar de volumen la densidad no bajara, sino que se mantuviera constante, y la energía por unidad de volumen también permaneciera igual, de forma que la energía total *aumentara*? A esto nos referimos al decir que algo tiene «presión negativa» (la energía del interior del globo no aumenta al apretarlo, sino que aumenta cuando se *expande*). El ejemplo más cercano de la vida cotidiana lo ofrece una cinta de goma, porque al estirarla adquiere más energía.

Y esto es exactamente lo que tenemos con el campo inflatón que llena el espacio: es como una banda de goma y tiene la propiedad de que, cada vez que se dobla el volumen de espacio, su energía total también se dobla para mantener una densidad de campo

constante. Por tanto, el inflatón aporta energía al universo, igual que nosotros proporcionamos energía a una cinta de goma al estirarla.

Esto debería conducirnos a dos preguntas. En primer lugar, ¿por qué el inflatón causa la inflación del universo? Al fin y al cabo, una cinta de goma no experimenta una expansión espontánea por sí sola. Y, en segundo lugar, puesto que el inflatón genera energía, ¿de dónde sale esa energía? Ambos interrogantes tienen respuestas ingeniosas pero lógicas que se encuentran en las ecuaciones de la relatividad general, lo cual seguramente ya no le sorprenda.

Las ecuaciones de campo de Einstein dicen que la gravitación puede estar causada tanto por presión como por masa y energía. Por tanto, aunque algo con una presión positiva, como las moléculas de aire del globo, da lugar a una atracción gravitatoria normal, una sustancia con presión negativa causará lo contrario: antigravedad (o sea, separará todo en lugar de concentrarlo). El inflatón tiene la propiedad de que el efecto de repulsión de su presión negativa (o antigravedad) es mayor que la atracción gravitatoria normal causada por su energía, y eso hace que el espacio se expanda a un ritmo acelerado.

En cuanto al origen primero de la energía del inflatón, la respuesta es que la toma prestada de su propio campo gravitatorio. Imagine una pelota en la cima de una colina: cuenta con un almacén de energía potencial positiva que convertirá en energía cinética si cae rodando. Pero un balón situado al pie de la colina no tiene ninguna energía potencial, mientras que otro en el fondo de un pozo tiene energía potencial negativa (puesto que requerirá energía para subirlo y colocarlo de nuevo al nivel del suelo). Es como si nuestro universo comenzara sin ningún espacio ni energía, pero una fluctuación cuántica hiciera que echara a rodar por una pendiente de energía gravitatoria. A medida que descendía hacia el valle gravitatorio fue adquiriendo energía positiva suministrada por su creciente energía potencial gravitatoria negativa (véase la figura 5). En este caso los cosmólogos hablan de chollo superlativo: algo a partir de nada. Es una respuesta estupenda para la pregunta: ¿De dónde salió en un primer momento toda la materia y energía que hay en el universo?

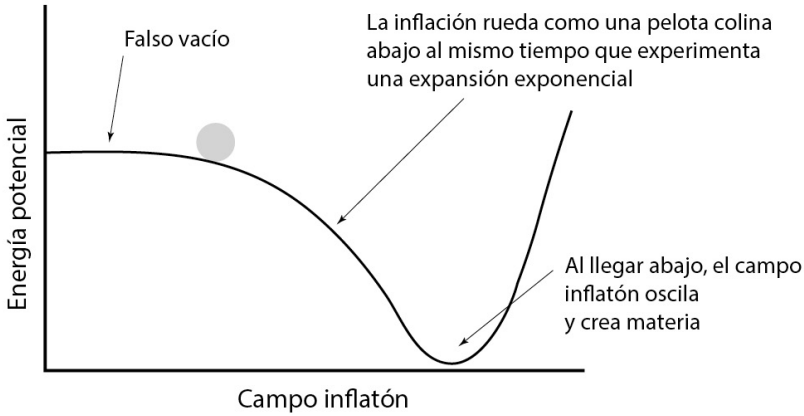

Figura 5. La inflación: el universo adquirió su energía positiva (de la cual surgió toda la materia) «rodando» por una pendiente de energía gravitatoria potencial al mismo tiempo que se expandía durante el descenso.

Otra manera de entender por qué la energía gravitatoria es negativa consiste en considerar el siguiente ejemplo: tenemos dos masas de partida separadas por una distancia infinita con cero energía gravitatoria entre ellas. A medida que se acerquen irán ganando poco a poco atracción gravitatoria, pero esta energía gravitatoria es negativa en tanto que hay que poner energía positiva para volverlas a separar y devolverlas al estado de energía cero del que partieron.

Cuando finalizó la inflación, la energía del inflatón decayó en energía normal, la cual se condensó en toda la materia que tenemos hoy. La materia que compone el universo se creó a partir de energía tomada de su propio campo gravitatorio: lo último en contabilidad creativa.

Pero el mero hecho de que la teoría de la inflación resuelva estos problemas cosmológicos no significa que sea correcta. Aunque la mayoría de cosmólogos suscribe esta teoría, hay otros que discrepan, y lo cierto es que quedan algunas cuestiones sutiles pendientes de esclarecer. Una de las voces críticas es la de Roger Penrose, viejo colaborador de Stephen Hawking. En lugar de la inflación, Penrose ha propuesto un modelo propio, denominado cosmología cíclica conforme, donde el universo atraviesa una serie infinita de épocas y cada una de ellas comienza con una fase

parecida a la Gran Explosión. Al final de cada ciclo, incluso después de haberse evaporado los agujeros negros, lo único que queda es radiación térmica. Esta, postula Penrose, sería similar a la radiación uniforme de alta energía que llenaba el universo justo después de la Gran Explosión y, a partir de una conexión ingeniosa entre la baja entropía del universo primigenio y la alta entropía del final del mismo (nada puede escapar a la segunda ley de la termodinámica), Penrose consigue enlazar el fin de un eón con el inicio de otro, de forma que todo recomience con una nueva Gran Explosión. Baste decir que esta propuesta es más controvertida aún que la teoría de la inflación.

Y ya que estamos metidos de lleno en el reino de la especulación, ¿por qué detenernos aquí? Una idea muy de moda dentro de la cosmología actual es lo que se conoce como inflación eterna. En este escenario, el universo no es más que una pequeña burbuja dentro de un espacio infinito y pluridimensional, conocido como multiverso, que lleva experimentando inflación desde siempre. De acuerdo con esta idea, la Gran Explosión que dio lugar a nuestro universo fue una simple fluctuación cuántica acaecida 13 820 millones de años atrás que creó una burbuja dentro de ese espacio eternamente inflacionario. El espacio dentro de esa burbuja (nuestro universo) dejó de experimentar inflación y ahora se expande a un ritmo más pausado, mientras que el multiverso exterior proseguía con su inflación desbocada. De este modo, en lugar de producirse un brevísimo episodio de inflación *después* de la Gran Explosión, las cosas habrían ocurrido al revés, de tal modo que la Gran Explosión que sufrió nuestro espacio marcó el *fin* de la inflación en nuestra región del multiverso.

Es más, la inflación eterna predice que hay otros universos burbuja dentro del multiverso, posiblemente un número infinito de ellos separados para siempre entre sí y todos alejándose con rapidez unos de otros debido al inflatón en expansión eterna.

Esta idea tiene una ventaja adicional que muchos cosmólogos consideran atractiva. Ya he hablado con anterioridad de que el ajuste fino no gusta en el mundo de la física, es decir, que no haya ninguna razón para que ciertas cantidades físicas tengan los valores que exhiben. Esto es crítico al considerar que las constantes más fundamentales tienen justo los valores precisos para que exista un

universo como el nuestro. Si la gravitación fuera tan solo un poco más débil, jamás se habrían formado galaxias y estrellas, y si la carga del electrón fuera muy poco más intensa, los átomos se colapsarían y no podría haber materia compleja. De modo que la teoría del multiverso en inflación eterna responde el interrogante de por qué está tan bien ajustado nuestro universo como para que existan estrellas, planetas y hasta vida. La respuesta es que puede haber universos burbuja de todas las clases, todos ellos sujetos a las mismas leyes de la física, pero cada cual con un conjunto particular de constantes fundamentales de la física. Nosotros nos encontramos por casualidad en uno que es perfecto para la emergencia de la vida, y contemplamos lo venturoso que es eso.

Aquí también debería añadir, para evitar confusiones, que estos universos burbuja no son lo mismo que las realidades paralelas de la interpretación del multiverso (o la pluralidad de mundos) de la mecánica cuántica, las cuales emergen de los distintos resultados posibles al medir del mundo cuántico. Los universos burbuja de la teoría de la inflación eterna no son realidades paralelas o superpuestas, sino completamente independientes unos de otros.

Y antes de proseguir, quisiera añadir otro detalle importante. Cabría preguntarse si nuestro universo tiene una extensión infinita (aunque no podamos ver más allá del horizonte visible), y bien podría serlo. Entonces, ¿cómo puede caber un espacio infinito dentro de una burbuja finita suspendida en el multiverso junto a otros universos burbuja? La respuesta es un tanto extraña: para nosotros, que estamos en su interior, el universo podría ser infinito en cuanto a extensión, pero finito en cuanto a tiempo. Sin embargo, esto se debe a que tenemos una visión deformada del espacio y el tiempo al contemplarlos desde el interior de la burbuja. Visto desde «fuera», nuestro universo se revelaría de un tamaño finito, pero existiendo dentro de un tiempo infinito (véase la figura 6). Es una forma estupenda (aunque conceptualmente muy difícil, ¡lo siento!) de concebir cómo puede caber un espacio infinito dentro de un volumen finito.

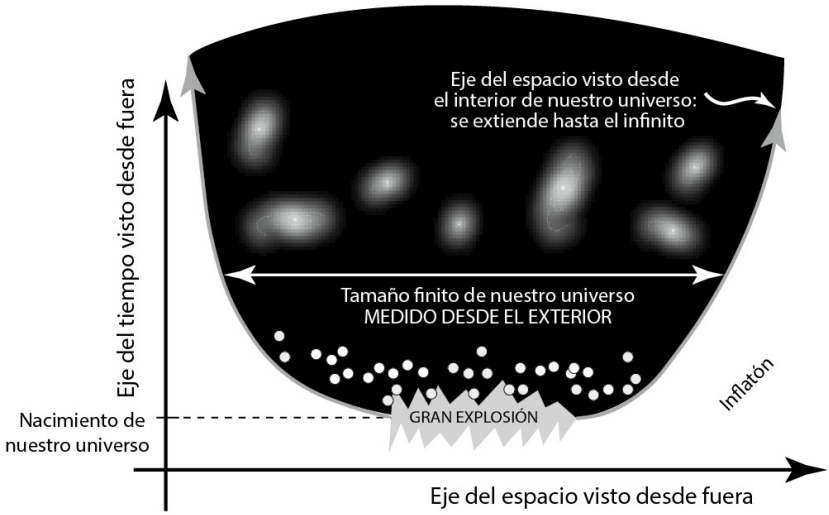

Figura 6. ¿Cómo puede caber un espacio infinito dentro de un volumen finito? Dos perspectivas de nuestro universo: visto desde el «exterior» siempre tiene un volumen finito, pero para nosotros, que estamos dentro de nuestro espacio-tiempo, el eje del espacio está curvado, de modo que apunta hacia el infinito a lo largo del eje del tiempo. Nosotros lo vemos como si todos los tiempos coincidieran para arrojar una extensión espacial infinita.

Información

Un tema del que apenas he hablado y que combina los tres pilares fundamentales de la física (la mecánica cuántica, la relatividad general y la termodinámica) guarda relación con la relevancia de la información en física. Ahora se sabe que la información es algo más que una mera noción abstracta y que en realidad se puede cuantificar con precisión. Un viejo enigma que señaló por primera vez Stephen Hawking es qué sucede con la información, digamos este libro que lee usted, si la arrojáramos a un agujero negro. El libro en sí se perdería para siempre, desde luego, pero ¿qué pasaría con la información que contiene? Con esto me refiero a la información física codificada en las palabras del libro y que sería necesaria para reconstruirlas. Pues resulta que la mecánica cuántica dice que la información no se puede destruir y siempre se

conserva[36]. Hawking describió la lenta evaporación de un agujero negro mientras pierde su energía en lo que se conoce como radiación de Hawking, y la mecánica cuántica establece que, en teoría, esa radiación porta consigo toda la información que engulló el agujero negro, incluida la información necesaria para reconstruir este libro. ¿Estamos seguros de esto? Una vez más, solo una teoría definitiva de la gravitación cuántica resolverá esta cuestión.

El estudio de las matemáticas de los agujeros negros también ha conducido al descubrimiento de que la cantidad máxima de información que se puede guardar en un volumen de espacio es proporcional no al volumen de dicho espacio, como cabría esperar, sino al área de superficie que circunda ese volumen. Esta idea se acabó conociendo como principio holográfico y se está revelando como una herramienta eficaz para la física teórica. En el fondo esto es así debido a una conexión profunda entre la información y la energía. Cuanta más información se guarda en un volumen de espacio, más aumenta su energía. Y como energía equivale a masa, esto significa fortalecer su campo gravitatorio hasta tal punto que el volumen de espacio se colapsa en un agujero negro. El principio holográfico establece que toda la información estará entonces codificada en el horizonte de sucesos del agujero negro. Se cree que esta idea se aplica incluso a la información necesaria para describir todo el conjunto del universo. Es probable que la información se revele cada vez más importante para conectar los tres pilares de la física.

ER = EPR

En 2013 dos físicos destacados, Juan Maldacena y Leonard Susskind, propusieron una idea que quizá aporte una nueva vía hacia la unificación de la gravitación con la mecánica cuántica. Aunque es demasiado pronto para valorar si están en lo cierto, también es demasiado fascinante como para no mencionarla aquí siquiera de pasada. Conocida simplemente como ER = EPR, esta idea sugiere que podría haber una conexión fundamental y profunda entre el entrelazamiento cuántico (dos partículas conectadas a través del espacio) y los agujeros de gusano del espacio-tiempo. Pero nótese que «ER = EPR» no es una ecuación

algebraica, a pesar del signo «igual» (si lo fuera podríamos cancelar la E y la R de ambos lados y dejar tan solo

$$P = 1$$

, lo que no tiene ningún sentido). En realidad se trata de las iniciales de los autores (Einstein, Podolsky y Rosen) de dos artículos clásicos publicados en 1935 con una diferencia temporal de tan solo dos semanas.

Hasta ahora no se había encontrado ninguna relación en absoluto entre ambos artículos. «ER» alude a Einstein y Nathan Rosen, quienes propusieron que dos agujeros negros pueden estar conectados a través de un túnel fuera de nuestras dimensiones, una idea que emerge de las matemáticas de la relatividad general. «EPR» hace referencia al segundo artículo que ambos publicaron junto con Boris Podolsky y en el que perfilaron sus dudas sobre el entrelazamiento en la mecánica cuántica (lo que Einstein llamó «conexiones fantasmales»). La novedad de la propuesta de Maldacena y Susskind es que estas dos ideas profundas, los agujeros de gusano y el entrelazamiento, podrían constituir en realidad un mismo y único fenómeno. El tiempo dirá si van por la buena senda.

¿Crisis en la física?

¿Llegaremos entonces alguna vez a entender por completo la realidad o seguiremos eternamente retirando capas de la cebolla para ir revelando realidades subyacentes más profundas? Lo cierto es que esto es lo que hemos hecho hasta ahora. Primero descubrimos que todo se compone de átomos; después, que esos átomos consisten a su vez en partes más pequeñas (electrones en órbita alrededor de un núcleo denso), más tarde escudriñamos el propio núcleo para descubrir que está formado por elementos constitutivos aún más pequeños: protones y neutrones, que por su parte consisten en cuarks de un tamaño incluso menor y son manifestaciones de campos de energía (o tal vez incluso cuerdas más reducidas aún que vibran en otras dimensiones). ¿Acabará esto algún día?

Encandilados por la belleza de sus ecuaciones, algunos físicos teóricos han seguido ahondando y han propuesto ideas cada vez más exóticas y cada vez más difíciles de comprobar de forma

experimental, que han valorado tan solo por su capacidad explicativa y por su elegancia matemática (que son criterios importantes, estoy de acuerdo, pero no los referentes tradicionales para validar teorías científicas). Así que, en lugar de darnos palmadas en la espalda por lo lejos que hemos llegado, ¿deberíamos plantearnos la posibilidad de que nos estemos desviando demasiado de la senda de la física?

Muchos especialistas en física no dudarán en afirmar que los últimos años han sido tremendamente emocionantes para la física fundamental, teniendo en cuenta la inmensa difusión que tuvo el descubrimiento del bosón de Higgs en el Gran Colisionador de Hadrones en 2012, seguido por la detección de ondas gravitatorias en las instalaciones del LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, «Observatorio de Ondas Gravitatorias con Interferómetro Láser») en Estados Unidos en 2016. Pero lo cierto es que estos dos hallazgos observacionales, aunque cruciales, se limitan a confirmar predicciones emitidas por teóricos hace mucho tiempo (cincuenta años en el caso del bosón de Higgs, y un siglo entero en el de las ondas gravitatorias). Sé que parece que les resto importancia y no quisiera menospreciar los logros extraordinarios de los miles de físicos e ingenieros experimentales que participaron en esos dos descubrimientos extraordinarios. Pero cuando digo que se «limitaron» a eso, me refiero a que no había muchas voces dentro de la comunidad de físicos que no contaran con que estas confirmaciones experimentales se lograrían algún día. En el caso del bosón de Higgs, aunque el descubrimiento se llevó el premio Nobel de física del año siguiente, este recayó sobre los teóricos que lo habían predicho en la década de 1960, no sobre las personas que confirmaron la observación mediante experimentos.

Creo que debo hacer una distinción más cuidadosa aquí entre el descubrimiento del bosón de Higgs y la detección de las ondas gravitatorias. El primero no era en absoluto un resultado inevitable. Muchos físicos, incluido Stephen Hawking, habían dudado de su existencia antes de 2012. Las ondas gravitatorias, en cambio, sí que se esperaban, porque no solo las predecía la relatividad general, sino que se habían observado de forma indirecta muchos años atrás en el comportamiento de los púlsares binarios (pares de estrellas de neutrones que se orbitan entre sí).

De hecho, si vuelvo la vista a las tres últimas décadas y pienso en alguno de los logros y descubrimientos apasionantes de la física fundamental, como el cuark cima, los condensados de Bose-Einstein, el entrelazamiento cuántico, las coalescencias de estrellas de neutrones y los exoplanetas, podría decir que ninguno de ellos fue completamente inesperado. En realidad, solo uno de los descubrimientos de la física durante ese periodo fue verdaderamente revolucionario y sorprendente (para los primeros astrónomos que lo observaron, aunque no para todos los cosmólogos): el de la energía oscura en 1998. Por lo demás, a la hora de comprobar teorías y modelos en los extremos máximos de la física fundamental (a escalas cuánticas y cósmicas) se ha producido un silencio experimental. Muchas de las ideas y de las teorías especulativas que he presentado en este capítulo bien podrían revelarse correctas. Pero es importante señalar que los experimentos tradicionales que han servido para comprobar o refutar teorías científicas en el pasado difícilmente serán capaces de ayudarnos en el futuro a tener un grado suficiente de confianza sobre su veracidad.

Cuando el Gran Colisionador de Hadrones empezó a funcionar en el año 2010 era el más reciente de una serie de aceleradores de partículas montados por todo el mundo desde hace casi un siglo para hacer chocar materia subatómica a energías cada vez más altas. Los físicos han esperado mucho tiempo hasta la llegada del Gran Colisionador de Hadrones y tenían grandes esperanzas puestas en que los ayudaría a responder un conjunto de interrogantes notables y a eliminar incertidumbres del modelo estándar. Pero, por encima de todo lo demás, se apostó por él para el descubrimiento del bosón de Higgs, y así lo hizo, lo que constituyó sin duda un éxito rotundo y una justificación del coste inmenso del proyecto. Pero desde entonces ha aumentado la frustración al no descubrirse nada más, tanto entre los científicos de otras disciplinas que envidian la financiación del CERN como entre los físicos teóricos impacientes por confirmar sus predicciones más recientes.

¿Y qué hay del descubrimiento del propio bosón de Higgs? ¿Qué novedades ha desvelado sobre la naturaleza de la materia? Conviene señalar que el bosón de Higgs no es más que la manifestación en forma de partícula (excitación) de algo más

fundamental, que es el campo de Higgs, otro campo cuántico que permea todo el espacio y es un ingrediente crucial del modelo estándar, porque la forma en que se mueven otras partículas por el campo de Higgs es lo que les confiere su masa. Por ejemplo, los bosones W y Z, portadores de la fuerza débil, no tendrían masa sin él, y se parecerían más al fotón, su primo carente de masa. Pero los bosones W y Z sí tienen masa, y es el mecanismo de Higgs el que explica cómo la adquieren: a través de su interacción con el campo de Higgs de una manera diferente a la del fotón. La prueba definitiva de la existencia del campo de Higgs llegó no a través de su detección directa, sino de un modo indirecto, mediante la creación del efímero cuanto ligado al campo: el bosón de Higgs.

El hallazgo del campo de Higgs supuso un gran logro. Pero en realidad era como una casilla pendiente de marcar. El campo de Higgs estaba atornillado al modelo estándar, el cual conseguía así vivir para luchar un día más. El descubrimiento del bosón de Higgs no abrió muchas avenidas nuevas dentro de la investigación en física fundamental porque no mejoró los conocimientos existentes más allá de lo que ya sabían y esperaban los especialistas. El modelo estándar sigue siendo un paradigma sólido para la comprensión de los elementos esenciales de la materia, pero no es una teoría plenamente coherente o predictiva.

Por supuesto, quedan muchos datos pendientes de un estudio pormenorizado en el Gran Colisionador de Hadrones desde su último periodo de funcionamiento, que finalizó en diciembre de 2018, así que aún podemos encontrar algo nuevo cuando se analicen. Pero la cuestión es que aún quedan interrogantes notables por responder, y puede que tengamos que mirar más allá del Gran Colisionador de Hadrones para aclararlos. Estas son algunas de esas preguntas: ¿Por qué la gravitación es mucho más débil que el resto de fuerzas? ¿Por qué hay tan solo tres generaciones de cuarks y de leptones? Y ¿de dónde sale la masa del propio bosón de Higgs? Pero probablemente la más acuciante de todas, y por tanto la más frustrante, porque no se ha resuelto, es si encontraremos alguna prueba de la supersimetría.

El mero hecho de que queramos que la supersimetría sea real no la convierte en verdad. Sin duda resuelve muchos problemas y nos aporta información útil. También es impecable y lógica y

estéticamente satisfactoria. Pero cuanto más tardamos en encontrar una prueba experimental de la supersimetría, más nos frustramos. Al mismo tiempo, los críticos de la teoría de la supersimetría se quejan de que este tema sigue atrayendo a las mentes más brillantes porque ofrece puestos de trabajo. Los investigadores jóvenes se sienten más seguros siguiendo los pasos de sus profesores y temen perder financiación y no avanzar en su carrera si no lo hacen. Entretanto, los departamentos de física de las universidades, que compiten por unos recursos escasos, contemplan la investigación en teoría de cuerdas como una forma barata de trabajar en la vanguardia de la física. Pero si el avance sigue siendo lento y no aparece ningún signo experimental nuevo que respalde los esfuerzos de quienes trabajan en este campo, las voces discordantes ganarán intensidad.

Algunos podrían aducir que si la supersimetría fuera correcta, entonces ya deberíamos haber encontrado indicios de ella en el Gran Colisionador de Hadrones. Los modelos más simples de la supersimetría (lo que se denomina supersimetría mínima restringida) ya suenan improbables de por sí. Pero eso no significa que haya que descartar la supersimetría ya (puede que la estemos buscando en el lugar equivocado). Al fin y al cabo no solo figura en la lista de los deseos de los especialistas en teoría de cuerdas. Hay físicos de partículas con los pies más anclados en la tierra que también quieren saber si la naturaleza es supersimétrica. La supersimetría permite establecer una conexión entre la fuerza electrodébil y la fuerza nuclear fuerte descrita por la cromodinámica cuántica. También enlaza las partículas de materia con las partículas portadoras de fuerza. Hasta explicaría por qué el bosón de Higgs tiene la masa que tiene. Pero la resolución de todos estos interrogantes tiene un precio: la supersimetría predice la existencia de un sinfín de partículas nuevas que aún no se han descubierto.

Por supuesto, también debo añadir que hay un premio adicional si la supersimetría resultara ser cierta: las variedades más ligeras de estas partículas supersimétricas que aún no se han observado encajarían como elementos constituyentes de la materia oscura.

Razones para el optimismo

Los físicos teóricos no se han sentado a esperar la llegada de noticias por parte de sus colegas especialistas en experimentación. Fascinados por el esplendor de sus matemáticas, han seguido avanzando sin ellos. En cuanto Edward Witten propuso la última versión de la teoría de cuerdas (la teoría M) a mediados de la década de 1990, Juan Maldacena desarrolló una idea nueva en 1997. Se conoce como dualidad gauge/gravedad (o, si preferimos su nombre técnico, AdS/CFT[37]) y describe cómo se relacionan las cuerdas de la teoría de cuerdas con las teorías de campo que describen las tres fuerzas cuánticas. Esta idea matemática se ha desarrollado desde entonces en términos más generales para abordar problemas en otras áreas de la física teórica, como la hidrodinámica, plasma cuark-gluon y materia condensada, y el artículo de Maldacena se ha convertido en uno de los trabajos más importantes de la física teórica moderna, citado hasta el día de hoy más de 17 000 veces en otras publicaciones académicas.

Ideas tan potentes como la dualidad gauge/gravedad convencen a muchos físicos de que la teoría de cuerdas es el camino correcto que hay que seguir. Pero aunque resultara no ser la teoría correcta de la gravitación cuántica, ya ha aportado a la comunidad de físicos unas herramientas matemáticas útiles y precisas que evidencian que hay una manera de combinar con solidez la mecánica cuántica con la relatividad general, y con ello alimenta la esperanza de que el proyecto de la unificación es posible, al menos en principio. Pero la cuestión principal sigue siendo que la mera belleza matemática de la teoría de cuerdas o de la dualidad gauge/gravedad no las convierte en verdaderas.

Entonces, ¿de dónde vendrá la respuesta final? Tal vez de la teoría de cuerdas, quizá del estudio de los agujeros negros, puede que de las personas que trabajan en teoría de la información cuántica intentando construir computadoras cuánticas, o tal vez incluso de la teoría de la materia condensada. Se está viendo con claridad que formas similares de matemáticas se aplican a todas esas áreas. Puede que para encontrar una teoría correcta de la gravitación cuántica ni siquiera sea necesario cuantizar la gravedad después de todo. Tal vez intentar forzar la fusión de la teoría

cuántica de campos con la relatividad general sea una estrategia equivocada. Hay algunos indicios de que las teorías cuánticas de campos ya pueden contener en sí mismas la esencia del espacio-tiempo curvo, y de que la relatividad general podría estar más cerca de la mecánica cuántica de lo que pensamos.

Sería fascinante saber cuál de las muchas ideas y teorías expuestas en este capítulo resultará ser la correcta y cuál acabará en el vertedero de la ciencia descartada. Para mí el interrogante más importante de la física que falta por responder es uno que me ha incordiado durante toda mi vida profesional: ¿cuál es la interpretación correcta de la mecánica cuántica? En el capítulo 5 comenté algunas de las ideas candidatas y mencioné que muchos físicos lo consideran un problema que deben abordar los filósofos, puesto que no ha impedido la aplicación de la mecánica cuántica ni ha frenado el avance de la física. Pero un número cada vez mayor de físicos, incluido un servidor, contemplan los fundamentos de la mecánica cuántica como un campo de vital importancia, y sospecho que la resolución del viejo problema de su interpretación conducirá con el tiempo a una física nueva. Hasta podría guardar relación con alguno de los problemas más importantes de la física fundamental, como la naturaleza del tiempo o la teoría definitiva de la gravitación cuántica.

A veces estas cuestiones parecen tan difíciles de superar que no me sorprendería que acabáramos necesitando la ayuda de una inteligencia artificial (IA) avanzada. Tal vez sea una IA de nuestra invención la que se erija en el próximo Newton o Einstein, y quizá nos veamos obligados a aceptar que el insignificante cerebro humano no es lo bastante inteligente para averiguar por sí solo la naturaleza última de la realidad [38].

He dedicado este capítulo a exponer el futuro de la física, sobre todo en relación con la física matemática y la física extrema de las escalas más pequeñas y más grandes. Pero ¿es lo correcto? ¿Está justificado que estas sean las verdaderas fronteras de la física? No todos los avances dentro de la física consisten en empeñarse en ver cosas más pequeñas o más lejanas, y las escalas de tamaños y energías en la vida cotidiana no son menos fascinantes. De hecho, en lo que respecta a la capacidad de la física para transformar nuestras vidas en el siglo XXI, lo emocionante está en disciplinas

como la física de la materia condensada y la óptica cuántica, y en áreas en las que la física se solapa y se funde con la química, la biología y la ingeniería. Por tanto, en lugar de ahondar en algunos de esos temas aquí, los usaré como ejemplo de la forma en que las aplicaciones tecnológicas de la física están modelando el mundo, y en el próximo capítulo examinaré lo que algunos llamarían los aspectos más «útiles» de la física.

9. La utilidad de la física

Mire a su alrededor dondequiera que esté leyendo este libro. Gran parte de lo que hemos creado y construido solo ha sido posible gracias a que hemos desentrañado las leyes de la naturaleza: las fuerzas que configuran el mundo y las propiedades de la materia sobre la que actúan esas fuerzas. Por eso sería imposible relacionar en una lista todas las aplicaciones de la física, todos los elementos del mundo moderno derivados de los descubrimientos físicos logrados a lo largo de siglos[39], así que, en lugar de hacer eso, me centraré en dos temas. El primero de ellos es la forma en que la física ha servido de base a otras disciplinas, tanto puras como aplicadas, o se ha solapado o incluso fundido con ellas, y la relevancia que sigue teniendo en algunos campos de investigación novedosos, interdisciplinares y fascinantes. El segundo es una mirada breve a una serie de aplicaciones nuevas que sin duda surgirán de la investigación actual dentro de la física, con una atención especial a las perspectivas apasionantes que arrojan las nuevas tecnologías cuánticas.

A estas alturas del libro sería perdonable que llegara usted a la conclusión de que está muy bien la obsesión de los físicos por unificar los principios matemáticos que rigen el funcionamiento de la naturaleza (una muestra de la tenacidad humana por comprender el universo), pero ¿para qué? Sin duda pensará que el descubrimiento del bosón de Higgs no tendrá ninguna repercusión directa en la vida cotidiana de las personas; ni la esperada teoría de la gravitación cuántica ayudará a erradicar la pobreza y la enfermedad. Pero esta no es la forma correcta de ver las cosas. La ciencia fundamental, la que surge de la curiosidad, ha conducido en repetidas ocasiones a avances tecnológicos que han revolucionado el mundo. La mayoría de la investigación en física, sobre todo la realizada desde el mundo académico, no está motivada por las

posibles aplicaciones prácticas de esos trabajos, y si echamos una ojeada a los grandes descubrimientos científicos del pasado que más tarde reportaron algún beneficio práctico, descubrimos que muchos de ellos salieron del mero deseo de entender el mundo y de satisfacer la curiosidad humana.

Veamos una comparación superficial entre la física y la ingeniería. El alumnado que cursa ingeniería mecánica o eléctrica estudia muchos temas idénticos a los que se imparten en física, como la mecánica newtoniana, el electromagnetismo, computación y las técnicas matemáticas necesarias para resolver ciertos tipos de ecuaciones que aparecen a menudo. De hecho, muchos especialistas en física aplicada acaban trabajando en el sector de la ingeniería industrial, lo que difumina aún más las fronteras entre ambas disciplinas. Pero lo habitual es que los físicos se pregunten el por qué y el cómo de las cosas para llegar a los principios subyacentes que determinan el funcionamiento de la naturaleza, mientras que un ingeniero no suele guiarse por esos principios profundos y, más bien, destinará sus cavilaciones a la construcción de un mundo mejor. Tanto la física como la ingeniería resuelven problemas, pero se guían por motivaciones distintas para alcanzar esas soluciones.

Por poner un ejemplo concreto, el brillante logro ingenieril de los sistemas de navegación por satélite (como el GPS estadounidense, que ha sido uno de los más importantes en las últimas décadas) demuestra con claridad el valor de la investigación en física pura que sirve de base a la ingeniería. Los sistemas de GPS están ahora tan integrados en nuestra vida que no podríamos vivir sin ellos. No solo damos por hecho que ya no nos perderemos en lugares del mundo que no conocemos, sino que el GPS nos ha permitido ver el planeta desde las alturas y cartografiarlo con un grado de detalle notable, lo que facilita el estudio del cambio climático o la predicción de fenómenos naturales y la gestión de labores de socorro en caso de desastre. En el futuro, los satélites de posicionamiento global se conectarán a sistemas de inteligencia artificial (IA) para transformar el transporte, la agricultura y muchos otros sectores. Y, sin embargo, sin el conocimiento procedente de la investigación en física fundamental, el GPS no habría sido posible. Por ejemplo, los relojes atómicos que viajan a bordo de los satélites son necesarios para garantizar su localización

precisa y que puedan determinar nuestra posición en el suelo, y su funcionamiento depende de que en ingeniería se tenga en cuenta la naturaleza cuántica de las vibraciones atómicas, así como correcciones relativistas para seguir el flujo del tiempo explicadas por las teorías de Einstein.

Hay un sinfín de ejemplos tecnológicos adicionales que han cambiado el mundo por la superposición de la física y la ingeniería. Y no es esta la única disciplina con la que la comunidad de físicos ha mantenido una relación laboral cercana. En la actualidad hay muchos físicos que trabajan mano a mano con otros científicos de ramas muy diversas, como la medicina, la neurociencia, la informática, la bioingeniería, la geología, las ciencias medioambientales y la ciencia espacial. También encontramos físicos que aplican sus habilidades lógicas, numéricas y de resolución de problemas fuera de la ciencia, en profesiones que van desde el ámbito político hasta el financiero.

La confluencia de la física, la química y la biología

A lo largo de la historia de la ciencia siempre ha habido una superposición enorme entre la física y su disciplina hermana: la química. De hecho, algunos de los grandes científicos de todos los tiempos, en especial Michael Faraday, han sido aclamados por ambas disciplinas. Y no ha ocurrido solo con la química; la importancia de la física sobre todo en el seno de la biología tiene una historia fascinante. La comunidad de físicos interesados por los problemas biológicos es increíblemente diversa, y su trabajo ha dado lugar a un campo de investigación muy activo denominado biofísica. Pero la biofísica ¿es una rama de la física o no es más que la aplicación de los métodos de la física a los problemas de la biología? ¿Tiene alguna relevancia esta distinción? Si la física es lo que subyace en última instancia a la química y a los procesos químicos y si los fenómenos que ocurren en el interior de los organismos vivos no son más que química compleja, entonces de ello se deriva sin lugar a dudas que la física tiene que estar en el centro de la biología. Al fin y al cabo, todo, ya sea vivo o inerte, está hecho de átomos en última instancia y está sujeto a las leyes de la física. En su empeño por ahondar e identificar los principios

fundamentales que rigen el funcionamiento de la biología, los físicos se preguntan: ¿Qué diferencia la vida de la no vida *compuesta por idénticos ingredientes*? La respuesta radica en la física: la vida tiene la capacidad de mantenerse en un estado de entropía baja, apartada del equilibrio termodinámico, y es capaz de almacenar y procesar información. Por tanto, da la impresión de que la comprensión completa de qué tiene de especial la vida debe provenir de la física fundamental. Mientras escribo esto imagino a mis colegas especialistas en química y biología con los ojos vueltos de exasperación ante esta típica prepotencia de físico. Por otro lado, es cierto que muchos de los primeros avances en biología molecular y genética del siglo XX se debieron a físicos como Leó Szilárd, Max Delbrück y Francis Crick. Crick en particular, descubridor (junto con James Watson y Rosalind Franklin) de la estructura de doble hélice del ADN, estuvo muy influido por otro físico, Erwin Schrödinger, cuyo destacado libro de 1944 titulado *¿Qué es la vida?* sigue siendo relevante en la actualidad.

En el ámbito de la ciencia aplicada, la física ha sido determinante para el desarrollo de numerosas técnicas que se usan para examinar lo que está vivo, desde la difracción de rayos X hasta los escáneres de resonancia magnética. Hasta el humilde microscopio, sin el cual no podría funcionar ningún laboratorio de biología, fue inventado por físicos, gracias a cientos de años de estudio de la naturaleza de la luz y la forma en que las lentes la refractan y enfocan. Esas indagaciones culminaron con el trabajo de Antoni van Leeuwenhoek y Robert Hooke, quienes usaron el microscopio en el siglo XVII para estudiar organismos vivos. De hecho, si pensamos en las numerosas contribuciones que hizo Hooke a la ciencia, vemos que, de acuerdo con la definición actual, fue más físico que biólogo.

Un campo de investigación nuevo por el que me he interesado personalmente en los últimos veinte años es la llamada biología cuántica. Esta materia no debe confundirse con lo que acabo de comentar de que toda la vida se compone en última instancia de átomos y, por tanto, a un nivel fundamental, está sujeta a las reglas del mundo cuántico, como todo lo demás en el universo. Eso, por supuesto, se da por sentado. La biología cuántica guarda relación más bien con la investigación reciente en física teórica, biología

experimental y bioquímica, la cual sugiere que algunas de las ideas más antiintuitivas de la mecánica cuántica, como el efecto túnel, la superposición y el entrelazamiento, podrían tener cierto peso en el interior de las células vivas. Algunas observaciones experimentales cruciales relacionadas con el funcionamiento de las enzimas o con el proceso de la fotosíntesis parecen requerir una explicación cuántica. Esto ha supuesto una gran sorpresa para muchos científicos que se niegan a creer que un comportamiento tan extraño y sutil pueda influir en la maquinaria de la vida y, además, todavía se están debatiendo algunas de estas ideas. Pero no olvidemos que la vida ha tenido casi cuatro mil millones de años de evolución para dar con los atajos que supusieran alguna ventaja. Si la mecánica cuántica torna más eficiente un proceso o mecanismo bioquímico específico, entonces la biología evolutiva recurrirá a él. No es magia, es solo, bueno…, pura física.

La revolución cuántica continúa

No hay ninguna duda de que la mecánica cuántica ha tenido un gran impacto en la vida de las personas en el siglo XX (y comienzos del XXI), a pesar de actuar a escalas espaciales mucho más pequeñas que las que alcanzamos a detectar con los sentidos. Como es tan eficaz describiendo el mundo subatómico, no solo conforma la base de la física y la química, sino también de la electrónica moderna. Por ejemplo, el discernimiento de las reglas cuánticas que explican el comportamiento de los electrones en materiales semiconductores como el silicio está en los fundamentos del mundo tecnológico actual. Sin los conocimientos que tenemos sobre semiconductores no habríamos inventado el transistor y, con posterioridad, el microchip y las computadoras. El superordenador portátil que todos llevamos hoy encima (el teléfono inteligente) y sin el que nos sentiríamos completamente perdidos, está repleto de trucos de magia electrónica, y ninguno de ellos habría sido posible sin la mecánica cuántica. Lo mismo ocurre con muchos de los aparatos que tenemos en casa, desde los televisores hasta las consolas de videojuegos o las luces LED, los detectores de humo y, por supuesto, internet. De hecho, todo el ámbito de las telecomunicaciones depende de aplicaciones tecnológicas de la mecánica cuántica,

como los láseres y los amplificadores ópticos. Y ningún hospital moderno podría funcionar sin las aplicaciones de la mecánica cuántica, que incluyen desde los escáneres de resonancias magnéticas, tomografías por emisión de positrones (o PET) y tomografías computerizadas (CT) hasta la cirugía láser.

Pero la revolución cuántica no ha hecho más que empezar. En las próximas décadas asistiremos al advenimiento de numerosas maravillas técnicas nuevas derivadas de la investigación actual en física cuántica, como materiales inteligentes y materiales topológicos. Consideremos el grafeno, por ejemplo: capas independientes de átomos de carbono dispuestos en una red cristalina hexagonal. Dependiendo de la forma que se le dé y de cómo se manipule, el grafeno actúa como aislante, como conductor o incluso como semiconductor.

Es más, la investigación más reciente apunta a que dos capas de grafeno giradas y dispuestas con un ángulo particular entre sí pueden comportarse, en ciertas condiciones de temperatura baja y aplicando un campo eléctrico débil, como un superconductor por el que hacer circular una corriente sin ninguna resistencia eléctrica en absoluto (otro fenómeno cuántico). Se prevé que esta técnica, conocida como girotrónica, encuentre aplicaciones en gran variedad de dispositivos electrónicos que aún están por inventar.

Y hay mucho más. En la actualidad se está desarrollando una nueva generación de aparatos y tecnologías que se volverán ubicuos en nuestras vidas (aparatos capaces de crear y manipular estados exóticos de la materia utilizando trucos del mundo cuántico de formas novedosas). Avances en campos como la teoría de la información cuántica, la óptica cuántica y la nanotecnología permitirán desarrollar gran variedad de instrumentos de ese tipo. Por ejemplo, los gravímetros cuánticos de alta precisión captarán cambios minúsculos en el campo gravitatorio de la Tierra, de modo que se podrán localizar nuevos depósitos minerales o tuberías debajo de las carreteras para reducir las molestias al mínimo cuando los operarios tengan que acceder a ellas. Las cámaras cuánticas contarán con sensores que permitirán ver detrás de obstáculos; la toma de imágenes cuánticas será una técnica no invasiva para cartografiar la actividad del cerebro con potencial para efectuar un seguimiento de enfermedades como la demencia.

La distribución cuántica de claves (QKD, o *quantum key distribution*) permitirá intercambiar información con seguridad entre un lugar y otro. Las tecnologías cuánticas también ayudarán a construir máquinas moleculares artificiales capaces de realizar multitud de tareas.

La medicina en particular es un área en la que probablemente el mundo cuántico ejercerá un gran influjo en los años venideros. A escalas de longitud más pequeñas incluso que las células vivas veremos la emergencia de gran variedad de tecnologías nuevas y espectaculares, como nanopartículas con propiedades cuánticas únicas que les permitan unirse a anticuerpos para rastrear infecciones o que se puedan «programar» para replicarse tan solo en el interior de células tumorales y hasta para tomar imágenes del interior de las células. Entonces, sensores cuánticos permitirán tomar mediciones mucho más precisas y facilitarán la obtención de imágenes de biomoléculas individuales. Y con ayuda de las computadoras cuánticas, que comentaré en el próximo apartado, deberíamos poder secuenciar ADN mucho más deprisa que antes, así como resolver ciertas tareas relacionadas con la búsqueda de cualquier aspecto de la salud en todos esos datos masivos o *big data* hasta un nivel molecular.

Estoy siendo muy selectivo en los ejemplos que he expuesto aquí porque son miles los avances que se lograrán gracias a la física en los ámbitos de la tecnología y la ingeniería relacionados con las comunicaciones, la medicina, la energía, el transporte, la toma de imágenes o la teledetección. Pero hay una disciplina en particular que merece un apartado más extenso.

La computación cuántica y la ciencia del siglo XXI

Si la revolución cuántica del último siglo le pareció impresionante, espere a ver lo que nos tiene reservado el resto del siglo XXI. Esos avances no solo nos dotarán de juguetes más inteligentes que, según algunos, solo servirán para complicarnos más la vida, sino que nos ayudarán a solucionar algunos de los desafíos más grandes a los que se enfrenta la humanidad y transformarán nuestro mundo de formas todavía inimaginables. Una de las aplicaciones más apasionantes de

la física en el futuro es, sin lugar a dudas, la computación cuántica. Esos aparatos serán muy distintos de los ordenadores convencionales y se usarán para gran cantidad de tareas imposibles de realizar en la actualidad incluso con las supercomputadoras más potentes. Se espera que la computación cuántica ayude a la humanidad a resolver muchos de los problemas más difíciles de la ciencia, sobre todo si se combina con avances en inteligencia artificial.

Las computadoras cuánticas se basan de un modo muy directo en las propiedades menos intuitivas del mundo cuántico. En la computación clásica, la información se almacena y se procesa en forma de bits (o *binary digits*, es decir, dígitos binarios). Un solo bit de información tiene uno de estos dos valores: o cero o uno. Se usan combinaciones de interruptores electrónicos, cada uno de los cuales es una manifestación física de un bit de información que está o bien encendido o bien apagado, para crear puertas lógicas, los elementos fundamentales que componen un circuito lógico. En cambio, los ordenadores cuánticos basan su funcionamiento en lo que llamamos bits cuánticos, o «cubits», los cuales no están limitados a tener solo uno de esos dos estados binarios. Un cubit puede existir en una superposición cuántica de cero y uno simultáneamente y, como tal, puede portar mucha más información.

El ejemplo más simple de cubit sería un electrón cuyo espín cuántico puede ser paralelo (lo que llamamos espín «arriba») o antiparalelo (espín «abajo») a un campo magnético aplicado. Si entonces se aplica un pulso electromagnético adicional, este puede hacer que el espín del electrón pase de paralelo (0) a antiparalelo (1). Pero, como el electrón es una partícula cuántica, el pulso electromagnético también puede situarlo en una superposición de espín arriba (0) y abajo (1) al mismo tiempo. Dos electrones entrelazados pueden colocarse simultáneamente en una superposición de cuatro estados cuánticos posibles (00, 01, 10 y 11). Con muchos más cubits se puede desarrollar un circuito lógico cuántico complejo.

Cuando se entrelazan múltiples cubits entre sí, pueden actuar de forma coherente y, por tanto, procesar múltiples opciones al mismo tiempo, lo que los vuelve mucho más potentes y eficientes que sus equivalentes clásicos. Pero la creación de un dispositivo así plantea

ciertos problemas. Los estados cuánticos entrelazados son extremadamente delicados y solo se pueden mantener en unas condiciones especiales durante breves periodos de tiempo. El desafío no consiste tan solo en aislar y proteger esos estados del entorno circundante, el cual destruye la coherencia cuántica, sino en ser capaces de controlar la entrada y la salida de la información que procesan los cubits. Y eso se torna más difícil a medida que aumenta el número de cubits entrelazados. Una vez concluido el cálculo, se selecciona uno de los posibles estados finales de la superposición de los cubits y hay que amplificarlo para poder leerlo usando un dispositivo macroscópico (clásico), y este es tan solo uno de los numerosos problemas que quedan por resolver para llevar todo esto a la práctica.

A pesar de estos retos complejos, muchos laboratorios de todo el mundo compiten en la actualidad en la carrera por construir el primer ordenador verdaderamente cuántico. No hace muchos años ni tan siquiera estaba claro si sería posible crear un dispositivo así, pero ahora los grupos de investigación en este campo hablan de ver su sueño cumplido en una o dos décadas, y ya existen prototipos rudimentarios. Hoy hay diversos enfoques para la construcción de un ordenador cuántico y aún no está claro cuál será el más práctico. En general, los cubits se pueden crear a partir de cualquier partícula subatómica que exhiba un comportamiento cuántico y que pueda entrelazarse con otra, como los electrones y fotones, o iones suspendidos en campos electromagnéticos, o átomos atrapados en rayos láser, o líquidos y sólidos especiales en los que el espín cuántico de sus núcleos atómicos se pueda sondear usando la resonancia magnética nuclear.

Gigantes de la computación como IBM o Google participan en la carrera para construir el primer ordenador verdaderamente cuántico, pero de momento nadie ha conseguido crear todavía un sistema estable multicubit capaz de durar lo bastante como para ejecutar cálculos cuánticos viables en la práctica. También hay numerosas *startup* pequeñas trabajando en este campo. Algunas se centran en el problema de la estabilidad, mientras que otras trabajan para aumentar el número de cubits entrelazados. Pero se han conseguido avances, y no tengo ninguna duda de que la computación cuántica onmipresente será una realidad en el curso

de mi vida.

Es importante señalar que el desafío no consiste tan solo en diseñar el soporte físico o *hardware*. Los ordenadores cuánticos necesitarán también su propio soporte lógico (o *software*) particular para ejecutarlo en su interior, y aún hay pocos algoritmos cuánticos. Los ejemplos más conocidos son el algoritmo de factorización de Shor y el algoritmo de búsqueda de Grover. Lo que ya se ha probado es que esos algoritmos permitirán que los ordenadores cuánticos superen a sus equivalentes convencionales de maneras sorprendentes. No sustituirán en absoluto a los ordenadores clásicos actuales en todas sus funciones, sino que estarán muy bien preparados para resolver determinados problemas matemáticos específicos. En la vida cotidiana seguiremos usando ordenadores normales con una potencia y una velocidad de procesamiento cada vez mayores, sobre todo a medida que avancemos en varios frentes en inteligencia artificial, computación en la nube y el internet de las cosas (la perspectiva de que muchos dispositivos de los hogares y los lugares de trabajo estarán conectados y se comunicarán entre sí). Y los ordenadores clásicos seguirán procesando las montañas crecientes de datos que tenemos.

Sin embargo, hay problemas que ni siquiera los ordenadores clásicos más potentes del mañana serán capaces de resolver. La belleza de los ordenadores cuánticos es que su velocidad de procesamiento crece de forma exponencial con el número de cubits. Consideremos la información contenida en tres interruptores no cuánticos. Cada uno podrá valer o 0 o 1 y, por tanto, ofrecen ocho combinaciones diferentes: 000, 001, 010, 100, 011, 101, 110, 111. Pero tres cubits entrelazados permiten guardar esas ocho combinaciones a la vez. Cada uno de esos tres dígitos vale tanto 1 como 0 al mismo tiempo. En un ordenador clásico, la cantidad de información crece de forma exponencial con el número de bits. Así que N bits significa 2N estados diferentes. Un ordenador cuántico con N cubits puede emplear todos esos estados 2N a la vez. Lo difícil es diseñar algoritmos capaces de usar este espacio enorme de información.

Los ordenadores cuánticos se usarán algún día para resolver problemas en gran variedad de disciplinas: matemáticas, química, medicina e inteligencia artificial. Dentro de la química esperamos

usar ordenadores cuánticos para realizar modelos de reacciones químicas de alta complejidad. En 2016 Google desarrolló un dispositivo cuántico rudimentario capaz de simular por primera vez una molécula de hidrógeno, y desde entonces IBM ha logrado reproducir el comportamiento de moléculas más complejas. Es lógico que para entender la naturaleza del mundo cuántico se necesite una simulación cuántica. Al fin y al cabo, cada cual en su madriguera sabe más que el que viene de fuera. Con el tiempo los investigadores confían en poder utilizar simulaciones cuánticas para diseñar moléculas sintéticas y desarrollar nuevos fármacos. En agricultura, la química podría recurrir a los ordenadores cuánticos para descubrir catalizadores de fertilizantes que ayuden a reducir las emisiones de gases invernadero y a mejorar la producción de alimentos.

En el campo de la inteligencia artificial, los ordenadores cuánticos acelerarán de un modo espectacular la resolución de problemas complejos de optimización en aprendizaje de máquinas. Esto será crucial en diversas industrias donde es determinante el aumento de la productividad y la eficiencia para maximizar el rendimiento. En este caso es probable que la computación cuántica revolucione el campo de la ingeniería de sistemas contribuyendo a aportar información sobre optimización para agilizar la producción y reducir el derroche. En un futuro no muy lejano la ingeniería cuántica dominará en gran variedad de ámbitos, desde la mecánica cuántica y la ingeniería electrónica hasta la ingeniería de sistemas, inteligencia artificial y ciencias de la computación.

Lo más apasionante de todo, al menos para mí (suponiendo que siga aquí para presenciarlo), es que a mediados del siglo XXI bien podría ocurrir que veamos ordenadores cuánticos ejecutando programas de inteligencia artificial que respondan al fin algunas de las preguntas más importantes de la física fundamental. Seguramente serán ellos y no los humanos quienes logren los grandes descubrimientos.

Pero he elegido la computación cuántica como ejemplo de tecnología del futuro por otra razón. Algunos físicos teóricos han depositado sus esperanzas en la computación cuántica para servirse de ella. Por su naturaleza, la computación cuántica debería estar en condiciones de reproducir con precisión el mundo cuántico y, tal

vez, incluso de ayudarnos a encontrar la teoría correcta de la gravitación cuántica.

Con el contenido de este libro espero haber ofrecido una visión general sobre lo que la física nos ha permitido entender sobre el mundo, y transmitir que, como especie, seguimos haciendo uso de ese conocimiento. En el último capítulo me apartaré de esos asuntos para describir cómo interpreta el mundo un físico o, en realidad, cualquier persona con formación científica, y cómo logramos desentrañar lo que sabemos sobre él. En otras palabras, cómo funciona este gran edificio de la ciencia (no solo el conocimiento científico en sí, sino también el proceso mediante el cual lo adquirimos) y por qué confiamos en él.

10. El pensamiento físico

Sobre la sinceridad y la duda

Quisiera compartir con usted una historia que me parece interesante. En 2017 presenté un documental televisivo para la BBC titulado *Gravity and Me* [«La gravedad y yo»] que examinaba cómo ha ido evolucionando a lo largo de la historia de la ciencia la comprensión de ese concepto fundamental que moldea el mundo, desde su interpretación newtoniana como una fuerza invisible hasta su identificación con la mismísima estructura del espacio-tiempo. El proyecto resultó más divertido aún porque desarrollamos una aplicación de teléfono móvil que monitorizaba la ubicación del usuario registrando sus coordenadas GPS (latitud, longitud y altitud sobre el nivel del mar) a intervalos regulares. Después, esa información se usaba para calcular el ritmo al que transcurre el tiempo para el usuario. Según la relatividad general, el tiempo fluye a velocidades distintas dependiendo de la intensidad del campo gravitatorio en cada lugar. Una persona situada en la cima de una montaña se encuentra más lejos del centro de la Tierra que si está al nivel del mar, así que la persona en la montaña está sometida a un tirón gravitatorio terrestre algo más débil. Esto significa que en la cima de la montaña el tiempo también discurre algo más rápido que al nivel del mar. Es un efecto insignificante: menos de la billonésima parte de un segundo más deprisa por cada segundo transcurrido al nivel del mar. De modo que, aunque una persona pasara toda la vida en la cima de una montaña, manteniendo idénticos todos los demás factores (algo imposible, lo sé), viviría alrededor de un milisegundo menos que si hubiera pasado la vida al nivel del mar (de acuerdo con la medición de un hipotético reloj

muy preciso, aunque inútil por lo demás, que permaneciera suspendido en el espacio). Comparado con los beneficios muy superiores de respirar el aire puro de la montaña o de llevar una dieta saludable y la práctica regular de ejercicio, es una ventaja un tanto absurda. Pero el efecto físico es real, y la aplicación era divertida.

Para crear la aplicación, hubo que tener en cuenta otro factor. Tal como comenté en el capítulo 3, los relojes en movimiento van más lentos que los que están quietos. Así que, si nos movemos, podemos frenar el ritmo al que transcurre nuestro tiempo con respecto al de otra persona que esté quieta. Este efecto es aún más pequeño que el de la gravedad, porque no solemos desplazarnos a ningún lugar a una velocidad cercana a la de la luz, que es cuando el efecto se torna apreciable. Sin embargo, la aplicación tenía en cuenta el movimiento mediante la comprobación de la posición del usuario a intervalos regulares y, si cambiaba significativamente de ubicación, era capaz de calcular a qué velocidad se había desplazado.

Pero el detalle crucial es el siguiente. Nuestro planeta no es una esfera perfecta, está más abultado por el ecuador. Así que alguien situado en el ecuador está más lejos del centro de la Tierra que alguien situado en el polo norte (en torno a 22 kilómetros), de modo que, igual que el morador de la montaña, debería notar un tirón gravitatorio algo más débil. Por tanto, los relojes situados en uno de los polos, donde la gravedad terrestre es más intensa, deberían funcionar un poco más despacio que los situados en el ecuador (esto recibe el nombre de retardo temporal de la relatividad general). Sin embargo, la Tierra también gira sobre sí misma, así que los relojes situados en el ecuador se mueven más deprisa que los situados en el polo (comparados con lo que mediría el reloj de verificación suspendido en el espacio), así que los relojes que se encuentran en el ecuador tienen que marcar el tiempo más despacio que los situados en los polos (debido al retardo temporal de la relatividad especial). Estos dos efectos derivados de la relatividad especial y general son opuestos, así que ¿cuál gana? ¿Qué reloj marcha más despacio? Yo calculé ambos efectos por separado y concluí que un reloj situado en el polo funciona, en términos generales, más despacio porque está sometido a una

gravedad más intensa, a pesar de que el reloj situado en el ecuador marcha a una velocidad mayor.

Toda esta información matemática curiosa se introdujo en la aplicación usando mis fórmulas. Una campaña entusiasta en las redes sociales animó a miles de personas a descargarla y emplearla antes de que el programa se emitiera. Incluso recibimos diarios grabados por algunas personas, como un piloto y un alpinista, quienes aportaron un registro de los resultados obtenidos con su aplicación.

Después nos encontramos con un problema.

Paul Sen, que era mi productor y un tipo listo, me llamó una noche una semana antes de editar el programa para finalizarlo y justo antes de grabar el doblaje con mi voz para una emisión previa en la BBC poco tiempo después. Me dijo que había leído ciertos contenidos en un foro sobre física en internet que apuntaban a que yo podía haber metido la pata. Dejé de inmediato todo lo que estaba haciendo y volví a mirar los cálculos. También escribí por correo electrónico a media docena de colegas para que los comprobaran.

Lo cierto es que había cometido un error elemental. Los dos efectos (la ralentización del tiempo en el polo debido a que la gravedad es más intensa allí y el retardo del tiempo en el ecuador debido a que esa franja de la Tierra se mueve más rápido) se anulan ¡con absoluta exactitud! En realidad, todos los relojes situados al nivel del mar funcionan al mismo ritmo en cualquier parte de la Tierra, y el tiempo que miden se denomina Tiempo Atómico Internacional (o IAT por sus siglas en inglés). La superficie de la Tierra es un geoide, una superficie gravitatoria equipotencial donde no es casual la cancelación entre los dos efectos debidos a la relatividad especial y la relatividad general. Cuando el planeta se formó miles de millones de años atrás estaba incandescente y maleable y su rotación lo obligó a adoptar una forma más estable y abultada (achatada), lo que *aseguró* que todos los puntos de la superficie se encuentran sometidos al mismo potencial gravitatorio. Por tanto, el tiempo fluye al mismo ritmo en todas partes, siempre que se mida al nivel del mar (si ascendemos, el tiempo se acelera, y si descendemos por debajo de la superficie terrestre, se frena).

Los números que arrojaba mi aplicación eran erróneos y hubo

que corregir las fórmulas. Pero el problema era peor aún. En el programa había explicado cómo funcionaba la aplicación y todo el mundo vería mi error. El documental no se podía emitir en aquel estado.

Hablé con el productor y él pidió de inmediato a la BBC que retrasara la emisión. La solución más sencilla habría sido, por supuesto, volver a rodar las escenas en las que aparecía el error. Nadie se daría cuenta. Pero enseguida reparé en que aquello me brindaba una oportunidad excelente para ilustrar cómo funciona la ciencia en realidad. En lugar de ocultar el fallo, debía hablar sin reservas sobre él para mostrar que en ciencia es bueno cometer errores. Así que grabamos unas cuantas escenas nuevas en las que reconocía mi desatino en todo su esplendor y explicaba en qué me había equivocado. Esta confesión no requirió una valentía o una fortaleza especial por mi parte, ya que cometer errores es la manera habitual de avanzar en ciencia: son inevitables y aprendemos de ellos. Al fin y al cabo, si no erráramos ¿cómo íbamos a descubrir novedades sobre el mundo? Esto es lo que diferencia la ciencia de, por ejemplo, la política. ¿Cuántas veces oímos a un político admitiendo sin tapujos que se ha equivocado?

La historia de la ciencia está repleta de ejemplos que han aprendido de los errores del pasado, donde hipótesis y teorías nuevas reemplazan otras anteriores a medida que crece el conocimiento sobre la naturaleza y conseguimos nuevos datos empíricos. Pero ¿cómo explicar a la sociedad general el valor de este sistema consistente en emitir una hipótesis, comprobarla y rechazarla si no cuadra con los hechos? Todo esto tiene poco que ver con la mayoría del discurso público actual, sobre todo en las redes sociales, donde las voces más escuchadas suelen ser las de quienes prefieren la opinión personal y los prejuicios a las pruebas, el cotejo y el rigor.

¿Hay alguna lección que pueda enseñar la ciencia a la sociedad o nos acusarían de arrogantes y «elitistas»?

Otro rasgo muy relacionado con nuestra obsesión por la sinceridad y casi exclusivo de la investigación científica es la importancia de la duda. Esta característica se convierte a veces en nuestro peor enemigo al intentar explicar a la sociedad cómo funciona la ciencia. Admitimos que nunca estamos completamente

seguros de algo, que cada teoría científica no es más que la mejor opción en un momento determinado para explicar algo y que, en cuanto una teoría entra en conflicto con nuevas observaciones o datos, debemos estar dispuestos a revisarla o descartarla en favor de algo mejor. Pero entonces hay quien dice: «Si no estáis seguros de nada, ¿por qué habría que confiar o creer en lo que decís? Si no hay certeza, ¿a qué nos agarramos?». Esta reacción es comprensible. El deseo de *saber con seguridad* forma parte de nuestra naturaleza, y no nos basta con la «mejor opción» provisional.

Pero pensar así es no entender cómo avanza la ciencia. La fiabilidad de la ciencia no proviene de la certeza, sino de su completa apertura a la incertidumbre, al cuestionamiento de todo lo conocido en el presente y a reemplazar ese conocimiento por una explicación más profunda si se propone algo mejor. En otros ámbitos de la vida, esta actitud se consideraría caprichosa. Pero no en la ciencia. El avance de la ciencia depende del compromiso inquebrantable de sus integrantes con las cualidades de la sinceridad y la duda.

Veamos otro ejemplo del pensamiento científico que tal vez sorprenda a algún lector. La gente suele extrañarse al saber que muchos físicos (aunque no los que dedicaron años de su vida a construir el Gran Colisionador de Hadrones) esperaban que *no* se encontrara el bosón de Higgs. Es decir, no dar con el bosón de Higgs habría implicado algún error en el modelo estándar, lo que abriría la puerta a otras posibilidades físicas fascinantes. El mero hecho de marcar una casilla para confirmar algo que se sospecha real no es tan emocionante como descubrir que hay que hollar rutas de investigación inexploradas hasta ahora.

Por otro lado, algunos aficionados a la ciencia bienintencionados acusan a veces a los físicos de no estar lo *bastante* abiertos a considerar sus propuestas, como cuando proclaman que han detectado un error en la relatividad de Einstein. Lo cierto es que me encantaría que se demostrara que Einstein se equivocó, porque eso significaría que necesitamos una teoría diferente y mejor para reemplazar la suya, del mismo modo que la relatividad general mejoró la gravitación de Newton. Pero los profesionales de la física llevan un siglo comprobando, manoseando y escudriñando sin descanso las ideas de Einstein, y la teoría de la relatividad sigue

revelándose excelente. Puede que algún día se descubra una teoría mejor, por supuesto, que explique lo mismo que la relatividad y algo más. Pero aún no ha ocurrido.

De modo que, como parte de nuestro esfuerzo de siglos para encontrar explicaciones cada vez más fundamentales para los fenómenos físicos, seguimos intentando tumbar las teorías existentes a base de comprobaciones. Si sobreviven, confiamos en ellas… hasta que aparece algo mejor.

Sobre la teoría y el conocimiento

Cuando en medio de una conversación general alguien dice que tiene una teoría, suele referirse a que tiene una opinión sobre algo, un juicio que puede estar basado en algún indicio u observación, pero que también puede ser una mera sospecha o un presentimiento basados en la ideología o el prejuicio o en cualquier otro sistema de creencias. Esa «teoría», que puede resultar correcta o no, es muy diferente de lo que entendemos por teoría científica[40], la cual también puede resultar correcta o no, por supuesto, pero que, a diferencia de una mera opinión, debe cumplir una serie de requisitos importantes. En primer lugar, debe ofrecer una explicación de lo observado, ya sea en la naturaleza o en un experimento, y debe aportar datos que respalden esa explicación. En segundo lugar, una teoría científica debe ser verificable de acuerdo con el método científico: tiene que ser comprobable, y esas pruebas u observaciones deben ser reproducibles. Por último, una buena teoría científica ofrece predicciones nuevas sobre los aspectos que explica del mundo, las cuales también deben ser comprobables mediante observaciones o experimentos adicionales.

Las teorías científicas que triunfan, como la relatividad, la mecánica cuántica, la teoría de la Gran Explosión, la teoría de la evolución de Darwin, la tectónica de placas o la teoría del germen de la enfermedad, han estado sometidas a un escrutinio riguroso y todas se han convertido en las mejores explicaciones disponibles. Ninguna de ellas se puede desestimar, como se oye a menudo (sobre todo en relación con la evolución darwiniana), por ser «tan solo una teoría». Esta afirmación ignora lo que significa que una teoría científica se imponga, o sea, que tiene capacidad explicativa, que

está basada en hechos palpables y que hace predicciones que se pueden comprobar y, sin embargo, sigue siendo falsable, en tanto que si las observaciones o los resultados experimentales contradicen sus predicciones, entonces no puede ser correcta o, en el mejor de los casos, no basta para explicar toda la realidad.

¿Y cómo habría que combatir a quienes quieren dinamitar la ciencia y el método científico, a quienes defienden que su opinión debería tenerse en cuenta al margen de los hechos y que su teoría debería recibir el mismo crédito que la teoría científica que pretenden desafiar o cuestionar sin necesidad de atenerse a las mismas normas? Aunque pueda divertirnos que algunas personas crean que la Tierra es plana, que los aterrizajes de las naves Apollo en la Luna fueron un montaje o que el mundo se creó hace tan solo unos miles de años, ¿qué pasa con la gente que defiende posturas que no solo contradicen la ciencia bien asentada, sino que además son dañinas para la sociedad, como quienes niegan el cambio climático provocado por el ser humano, o quienes rechazan vacunar a sus hijos porque creen que hay una relación infundada entre la triple vírica y el autismo, o quienes prefieren la magia y la superstición a la medicina moderna?

Me frustra no tener una respuesta clara para estas preguntas. He dedicado la mitad de mi vida académica como físico a la investigación, intentando entender por mí mismo cómo funciona el universo. Mientras que la otra mitad la he pasado enseñando, divulgando y explicando lo que he aprendido. Así que no puedo eximirme sin más de la responsabilidad de implicarme y debatir temas científicos con el público general; muchas de estas cuestiones son demasiado importantes para *no* abordarlas. Pero también sé lo difícil que es cambiar las convicciones firmes de alguien sobre un tema, por muy equivocadas que me parezcan a mí.

En realidad, las teorías de la conspiración son el polo opuesto de las teorías científicas en tanto que aspiran a aceptar cualquier indicio que contradiga estas últimas y a interpretarlo de forma que respalde su idea central en lugar de rechazarla, lo que las convierte en *incuestionables*. En muchos casos se aspira a interpretar y propiciar los indicios de manera que confirmen las hipótesis de partida. Esto se denomina sesgo de confirmación. A menudo, en el caso de las creencias ideológicas, también se oye el término

«disonancia cognitiva», que consiste en sentir auténtico malestar mental ante indicios que sostienen una idea contraria a la propia. La potente combinación del sesgo de confirmación con el rechazo de la disonancia cognitiva funciona reforzando las creencias preexistentes. Así que intentar convencer a alguien con este esquema mental con pruebas científicas se traduce a menudo en una pérdida de tiempo.

Cuando recibimos un torrente de ideas muy dispares a través de los medios de comunicación de masas y las redes sociales, es comprensible que a mucha gente le cueste discernir qué debe creer. ¿Cómo diferenciar entre la información rigurosa basada en hechos y las noticias falsas? Una estrategia posible desde el ámbito científico sería perseguir el falso equilibrio. Es decir, si casi todas las personas expertas en climatología del mundo reconocen que el clima de la Tierra está cambiando con rapidez debido a la actividad humana y que hay que hacer algo con urgencia para evitar sus consecuencias catastróficas, los medios de información no deben contar con alguien que niegue el cambio climático para ofrecer «el punto de vista opuesto». Porque en esos casos la audiencia se queda con la impresión de que ambos discursos son igualmente válidos. Aparte de tener el peso de los datos científicos a su favor, la diferencia entre alguien que sostiene que el cambio climático antropogénico es real y alguien que lo niega es que la primera persona espera de verdad estar equivocada.

Una mente científica siempre admitirá que es posible que el cambio climático no esté ocurriendo, que tal vez la teoría de la evolución no sea cierta o que la teoría de la relatividad esté equivocada. Puede que la gravedad no siempre nos empuje contra el suelo y la meditación nos permita levitar. Pero todos esos «puede» no significan que no sepamos. Sabemos que seguiremos comprobando nuestras teorías y, si a pesar de ello siguen en pie, confiamos en ellas y las difundimos entre quienes no se dedican a la ciencia. Pero, como científicos, estamos orgullosos de expresarnos con sinceridad, así como de dudar. Igual que el término «teoría» tiene un significado distinto en ciencia al que tiene en una conversación cotidiana, también la «certeza» tiene un significado particular en ciencia. En el fondo de mis adentros estoy bastante seguro, por supuesto, de que es imposible vencer la fuerza de la

gravedad a través de la meditación y flotar por encima del suelo. También estoy convencido de que la Tierra es redonda, de que tiene miles de millones de años de edad y de que la vida evoluciona.

¿Tengo la certeza de que la materia oscura existe? Casi.

Sobre la verdad

A menudo he oído decir que hay distintas maneras de llegar a «la verdad» o, de hecho, que hay distintas clases de verdad. Seguro que un filósofo o teólogo que me lea encontrará de una ingenuidad supina mis simplistas ideas científicas sobre este asunto, pero, para mí, la verdad absoluta guarda relación con lo real y con lo que existe con independencia de la subjetividad humana. Así que, cuando digo que la ciencia es la búsqueda de la verdad, me refiero a que quienes nos dedicamos a ella aspiramos en todo momento a acercarnos lo máximo posible a la naturaleza última de las cosas, a una realidad objetiva que espera ahí fuera a ser descubierta y entendida. A veces parece que esta realidad objetiva no es más que una retahíla de hechos relacionados con el mundo que descubrimos despacio hasta conocerlos todos. Pero recuerde que en ciencia nunca se puede decir que algo se sabe con certeza. Siempre cabe la posibilidad de que, en algún momento posterior, logremos un discernimiento más profundo que nos acerque más a esa verdad última que perseguimos.

En la práctica hay muchas ideas y conceptos dentro de la ciencia sobre los que tenemos tal grado de certeza que podemos considerarlos verdades sin ningún peligro. Si salto desde un tejado, la Tierra tirará de mí hacia abajo (y yo tiraré de ella ligeramente hacia arriba) de acuerdo con una relación matemática simple que se acerca mucho a la exposición de los hechos. Aún no lo sabemos todo sobre la gravitación, pero sí conocemos sus efectos sobre los objetos de este mundo. Si suelto un balón desde una altura de cinco metros sé, sin necesidad de medirlo con un cronómetro, que estará en el aire un segundo antes de botar contra el suelo (no dos segundos, ni medio, sino uno). Puede que algún día encontremos una teoría nueva de la gravitación cuántica, pero jamás predecirá que esa pelota pasará el doble o la mitad de tiempo en el aire que lo que predice la ecuación del movimiento de Newton. Esa es una

verdad absoluta sobre el mundo. No hay ningún razonamiento filosófico, ninguna dosis de meditación, ningún despertar espiritual, experiencia religiosa, instinto natural o ideología política capaz de desvelar que una pelota que cae desde una altura de cinco metros tardará un segundo en llegar al suelo. Pero la ciencia sí.

En cierto sentido, pues, las lagunas que quedan en nuestro conocimiento sobre las leyes del universo (la naturaleza de la materia y de la energía oscuras, si la teoría de la inflación es atinada, la interpretación correcta de la mecánica cuántica, la verdadera naturaleza del tiempo, etcétera) no cambiarán nuestra comprensión de las fuerzas, la materia y la energía que conforman el mundo cotidiano. Los avances futuros dentro de la física no dejarán obsoleto lo que ya sabemos. Tan solo lo refinarán y brindarán un discernimiento más profundo.

La física humana

Por último, las personas que nos dedicamos a la física somos como todas las demás. Queremos que nuestras ideas y teorías sean correctas y a menudo las defendemos frente a la aparición de indicios en contra. Hasta las figuras más brillantes de la física han restado importancia a los problemas de sus teorías y han amplificado sus críticas contra una idea rival. Los sesgos de confirmación existen en la ciencia igual que en otros ámbitos de la vida, y los científicos no somos inmunes a ellos. Nos esforzamos por conseguir un puesto fijo y por ascender, competimos para conseguir financiación, intentamos cumplir el calendario de los proyectos, seguimos la máxima de «publicar o morir» y trabajamos duro para ganarnos el respeto de nuestros iguales y el beneplácito de nuestros superiores.

Y, sin embargo, parte del aprendizaje del método científico consiste en desarrollar humildad y sinceridad en la investigación para no dejarnos llevar por los más bajos instintos. Aprendemos a no dejar que nos cieguen nuestros deseos o que nos confundan nuestros sesgos e intereses personales. A veces es difícil notarlo si nos centramos en los individuos (y ha habido varios ejemplos bien documentados de fraude y corrupción dentro de la investigación científica). Pero las comunidades investigadoras cuentan con

mecanismos correctores, como la revisión por pares de los artículos científicos (y sí, sé que esta no es la forma ideal de evaluar la investigación) y la preparación rigurosa de las nuevas generaciones en la investigación ética y responsable. Esto significa que el método científico se rige, por su propia naturaleza, por la autocorrección. Exige repetibilidad y la continua evaluación sincera y crítica de las ideas. Las teorías enclenques acaban pereciendo, por mucho que sus defensores se empeñen en mantenerlas vivas y aunque a veces tardemos una generación o más en liberarnos de las cadenas hegemónicas de una teoría dominante particular con la fecha de caducidad ya vencida.

Las mejores figuras de la física suelen ser quienes son capaces de tomar perspectiva y despojarse de los prejuicios del consenso, la moda o la reputación, incluida la propia. Pero esto es más probable cuando ya se sabe que una teoría no es la última palabra sobre un asunto o cuando existen varias teorías rivales, cada una de ellas con sus defensores incondicionales. Y recuerde que la física, igual que todas las ciencias, no es una democracia. Basta una observación experimental nueva para tumbar una teoría que goce de la aceptación general y reemplazarla por otra. A partir de ahí, será la nueva teoría la que deba justificarse continuamente a la luz de los datos observacionales.

Cabría decir que muchas de las ideas más especulativas de la física fundamental actual (algunas de las cuales describí en el capítulo 8) no cumplen los requisitos de lo que constituye una verdadera teoría científica, ya que no se pueden comprobar mediante experimentos. Entre ellas incluiría (al menos por ahora) la teoría de cuerdas, la gravitación cuántica de lazos, la entropía de los agujeros negros y las teorías del multiverso. Y, sin embargo, hay miles de especialistas en física teórica de todo el mundo dedicados de lleno a la investigación en estos campos. ¿Deberían dejar de trabajar en ellos porque sus teorías aún no se pueden comprobar? ¿Están desperdiciando recursos públicos que podrían aprovecharse mejor en áreas de investigación más «útiles»? Y ¿qué es lo que motiva a esos físicos si no hay modo de comprobar sus teorías? ¿Están cegados por la belleza de sus ecuaciones? En efecto, es cierto que algunos investigadores han llegado a proclamar que no *necesitan* comprobar sus teorías con datos, sino tan solo con ellas

mismas en busca de coherencia y elegancia matemática, lo que me parece una senda peligrosa.

Sin embargo, una severidad excesiva con estas «búsquedas a ciegas» también puede desvelar una falta de imaginación y de aprecio por la historia de las ideas dentro de la ciencia. Cuando Maxwell escribió sus ecuaciones de los campos eléctrico y magnético e infirió a partir de ellas la ecuación de onda de la luz, nadie sabía, ni tan siquiera el propio Maxwell, cómo usarían aquellos conocimientos Heinrich Hertz, Oliver Lodge, Guglielmo Marconi y otros para desarrollar la radio. Ni tampoco el propio Einstein previó, al desarrollar sus teorías de la relatividad, que algún día se usarán para la navegación precisa de satélites que nos permiten usar las maravillas tecnológicas apiñadas en ese superordenador que llevamos en el bolsillo y que habría sido imposible sin las especulaciones abstractas de los primeros pioneros cuánticos.

De modo que los estudiosos de la cosmología inflacionaria, de la teoría de cuerdas y de la gravitación cuántica de lazos continúan con sus indagaciones, y hacen bien en seguir con ellas. Puede que sus ideas acaben siendo erróneas o que cambien el curso de la historia humana. O quizá haya que esperar la llegada de otro Einstein, tal vez incluso de una inteligencia artificial, que nos ayude a salir de la confusión actual. Aún no lo sabemos. Pero lo que sí podemos afirmar es que, si en algún momento dejáramos de sentir curiosidad por el universo y de investigar cómo se formó (y con él, nosotros), entonces dejaríamos de ser humanos.

La naturaleza humana es de una generosidad desmesurada. Inventamos el arte, la poesía y la música; hemos creado religiones y sistemas políticos; hemos construido sociedades, culturas e imperios tan ricos y complejos que no hay fórmula matemática capaz de aprehenderlos. Pero si queremos saber de dónde venimos, dónde se formaron los átomos que nos componen y el porqué y el cómo del mundo y el universo que habitamos, entonces la física es la senda hacia la verdadera comprensión de la realidad. Y ese conocimiento nos permitirá modelar el mundo y nuestro destino.

Agradecimientos

No es fácil encontrar el equilibrio para abarcar todo el campo de la física fundamental en un libro tan breve como este y destinado a un público general, y al mismo tiempo encontrar espacio para cierto grado de detalle que permita tener en cuenta las ideas más novedosas en muchos temas, y fundirlo todo en una misma trama. Es usted quien debe valorar si lo he conseguido o no. Y, además, he querido evitar algunas de las metáforas y analogías tan manidas que se suelen encontrar en los libros de divulgación científica, porque muchas de ellas acaban quedando desfasadas o incluso revelándose erróneas a medida que avanza el conocimiento.

Sin embargo, aunque hubiera conseguido todo eso, queda otro problema.

La isla de los conocimientos físicos está rodeada por el océano de lo que todavía queda por explicar, aunque el tamaño de la isla nunca para de crecer. Este volumen pretende ser un recorrido por sus playas, las fronteras del conocimiento actual. Pero la descripción concisa y exacta de este litoral no es fácil para nadie. Aunque cuento con más de tres décadas de investigación en física teórica, un cuarto de siglo de docencia universitaria y un periodo casi igual como divulgador y autor de libros científicos, y todo ello me ha permitido pulir mi capacidad para encontrar el lenguaje adecuado y desmenuzar conceptos complejos, también soy muy consciente de mis limitaciones para entender en su totalidad ramas de la física ajenas a mi especialidad. De modo que agradezco mucho a mis compañeros y colaboradores las numerosas y fructíferas conversaciones que he mantenido con ellos a lo largo de los años. También me siento muy en deuda con todas las personas que dedicaron su valioso tiempo a leer el manuscrito y, con ello, a aportar consejos y sugerencias que rellenaron lagunas en mis conocimientos. A menudo sugirieron cambios sutiles de expresión

para lograr una explicación más precisa sin sacrificar en ningún momento la claridad y la sencillez.

He disfrutado siendo polémico (aunque solo un poco) aquí y allá al expresar mis ideas sobre problemas pendientes de resolver dentro de la física. Siempre he procurado señalar con claridad dónde sigue habiendo debate y especulación, sobre todo cuando me he mostrado crítico con las ideas de consenso, ya fuera con los fundamentos de la mecánica cuántica o con la elección de los enfoques preferidos para la gravitación cuántica o la teoría de la inflación. Mi excusa es que no me he basado tan solo en mi opinión personal (aunque la defienda), sino más bien en las ideas de físicos por los que siento un gran respeto y que trabajan en la vanguardia de la investigación dentro de su campo.

En particular, quisiera agradecer a mis compañeros del Departamento de Física de la Universidad de Surrey, Justin Read, Paul Stevenson y Andrea Rocco, su profusión de comentarios útiles. Gracias también a Michael Strauss, de Princeton, por el esclarecimiento de diversos aspectos astronómicos, y a Andrew Pontzen, del University College de Londres (UCL), con quien he mantenido varias conversaciones fructíferas en los últimos tiempos sobre la naturaleza de la materia oscura y el significado de la teoría de la inflación. Mi agradecimiento también a dos de mis autores científicos favoritos, Philip Ball y John Gribbin, por su lucidez inestimable.

He hecho todo lo posible por tener en cuenta todos los comentarios y las sugerencias de las personas recién nombradas. Sin duda quedarán detalles con los que no todo el mundo estará de acuerdo, pero espero que no sean muchos. Lo que sé con seguridad es que gracias a ellos este libro mejoró mucho más de lo que habría podido esperar sin su ayuda.

Llevo muchos años ya disfrutando del placer de presentar la serie radiofónica de la BBC (Radio 4) titulada *The Life Scientific*, en la que entrevisto a muchos de los científicos más eminentes del mundo. Esta labor me ha dado la oportunidad de ahondar un poco más en las ideas más novedosas de la física fundamental, en especial en materias tan misteriosas como la física de partículas y la cosmología. Por ello me siento en deuda con Sean Carroll, Frank Close, Paul Davies, Fay Dowker, Carlos Frenk, Peter Higgs,

Lawrence Krauss, Roger Penrose y Carlo Rovelli, todos ellos invitados fabulosos de mi programa. Si hay algo en este libro que no cuente con su aprobación (y estoy seguro de que lo habrá), espero su perdón. Ellos no leyeron el manuscrito, pero su genio contribuyó sin duda a aclararme las ideas.

Por último, siento una inmensa deuda de gratitud con mi editora en Princeton University Press, Ingrid Gnerlich, por su apoyo entusiasta, sus consejos y sugerencias sobre la estructura y la forma del libro, los cuales me ayudaron a conferirle su configuración definitiva junto con la valiosa asistencia adicional de mi coeditora, Annie Gottlieb.

Huelga decir que mi mayor agradecimiento es para mi encantadora esposa, Julie, por su paciencia y respaldo, y también para mi agente (casi igual de encantador), Patrick Walsh: formamos un buen equipo.

Lecturas adicionales

A continuación encontrará una lista de obras de divulgación científica para ampliar los contenidos de este libro.

Física general

Peter Atkins, *Conjuring the Universe: The Origins of the Laws of Nature* (Oxford y Nueva York: Oxford University Press, 2018).

Richard P. Feynman et al., *The Feynman Lectures on Physics*, 3 vols. (Reading, MA: Addison-Wesley, 1963; edición revisada y ampliada, 2006; New Millennium ed., Nueva York: Basic Books, 2011); versión original completa y gratuita en internet en: http:// www.feynmanlectures.caltech.edu.

Roger Penrose, *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics* (Oxford y Nueva York: Oxford University Press, 1989). Versión en castellano: *La nueva mente del emperador*; trad. de Javier García Sanz (Barcelona: DeBolsillo, 2009).

Lisa Randall, *Warped Passages: Unraveling the Mysteries of the Universe's Hidden Dimensions* (Londres: Allen Lane; Nueva York: HarperCollins, 2005). Versión en castellano: *Universos ocultos: un viaje a las dimensiones extras del cosmos*; trad. de Eugenio Jesús Gómez Ayala (Barcelona: Acantilado, 2018).

Carl Sagan, *The Demon-Haunted World: Science as a Candle in the Dark* (Nueva York: Random House, 1996). Versión en castellano: *El mundo y sus demonios: la ciencia como una luz en la oscuridad*; trad. de Dolors Udina (Barcelona: Crítica, 2017).

Steven Weinberg, *To Explain the World: The Discovery of Modern Science* (Londres: Allen Lane; Nueva York, HarperCollins, 2015). Versión en castellano: *Explicar el mundo: el descubrimiento de la ciencia moderna*; trad. de Damià Alou (Barcelona: Taurus, 2015).

Frank Wilczek, *A Beautiful Question: Finding Nature's Deep Design* (Londres: Allen Lane; Nueva York: Viking, 2015). Versión en castellano: *El mundo como obra de arte: en busca del diseño profundo de la naturaleza*; trad. de Javier Sampedro (Barcelona: Crítica, 2016).

Física cuántica

Jim Al-Khalili, *Quantum: A Guide for the Perplexed* (Londres: Weidenfeld and Nicolson, 2003). Versión en castellano: *Cuántica: guía de perplejos*; trad. de Dulcinea Otero-Piñeiro (Madrid: Alianza Editorial, 2016).

Philip Ball, *Beyond Weird: Why Everything You Thought You Knew about Quantum Physics Is… Diferent* (Londres: The Bodley Head; Chicago: University of Chicago Press, 2018). Versión en castellano: *Cuántica: qué significa la teoría de la ciencia más extraña*; trad. de Inmaculada Pérez Parra (Madrid: Turner, 2018).

Adam Becker, *What Is Real? The Unfinished Quest for the Meaning of Quantum Physics* (Londres: John Murray; Nueva York, Basic Books, 2018).

Sean Carroll, *Something Deeply Hidden: Quantum Worlds and the Emergence of Spacetime* (Londres: OneWorld; Nueva York: Dutton, 2019).

James T. Cushing, *Quantum Mechanics: Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony* (Chicago y Londres: University of Chicago Press, 1994).

David Deutsch, *The Fabric of Reality: Towards a Theory of Everything* (Londres: Allen Lane; Nueva York: Penguin, 1997).

Versión en castellano: *La estructura de la realidad*; trad. de David Sempau (Barcelona: Anagrama, 1999).

Richard P. Feynman, *QED: The Strange Theory of Light and Matter* (Princeton y Oxford: Princeton University Press, 1985). Versión en castellano: *Electrodinámica cuántica: la extraña teoría de la luz y la materia*; trad. de Ana Gómez Antón (Madrid: Alianza, 1988).

John Gribbin, *Six Impossible Things: The «Quanta of Solace» and the Mysteries of the Subatomic World* (Londres: Icon Books, 2019).

Tom Lancaster y Stephen J. Blundell, *Quantum Field Theory for the Gifted Amateur* (Oxford y Nueva York: Oxford University Press, 2014).

David Lindley, *Where Does the Weirdness Go? Why Quantum Mechanics is Strange, but Not as Strange as You Think* (Nueva York: Basic Books, 1996).

N. David Mermin, *Boojums All the Way Through: Communicating Science in a Prosaic Age* (Cambridge, RU, y Nueva York: Cambridge University Press, 1990).

Simon Saunders, Jonathan Barrett, Adrian Kent y David Wallace, editores, *Many Worlds? Everett, Quantum Theory, & Reality* (Oxford y Nueva York: Oxford University Press, 2010).

Física de partículas

Jim Baggott, *Higgs: The Invention and Discovery of the «God Particle»* (Oxford y Nueva York: Oxford University Press, 2017).

Jon Butterworth, *A Map of the Invisible: Journeys into Particle Physics* (Londres: William Heinemann, 2017).

Frank Close, *The New Cosmic Onion: Quarks and the Nature of the Universe* (Boca Ratón, Florida: CRC Press/Taylor and Francis, 2007).

Gerard't Hooft, *In Search of the Ultimate Building Blocks*

(Cambridge, RU, y Nueva York: Cambridge University Press, 1997). Versión en castellano: *Partículas elementales: en busca de las estructuras más pequeñas del universo*; trad. de Ignacio Zúñiga (Barcelona: Crítica, 2017).

Cosmología y relatividad

Sean Carroll, *The Big Picture: On the Origins of Life, Meaning, and the Universe Itself* (Nueva York: Dutton, 2016; Londres: OneWorld, 2017). Versión en castellano: *El gran cuadro: los orígenes de la vida, su sentido y el universo entero*; trad. de Antonio Iriarte (Barcelona: Ediciones de Pasado y Presente, 2017).

Albert Einstein, *Relativity: The Special and the General Theory,* 100th Anniversary Edition (Princeton, Nueva Jersey: Princeton University Press, 2015). Versión en castellano: *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*; trad. revisada de Miguel Paredes Larrucea (Madrid: Alianza Editorial, 2012).

Brian Greene, *The Hidden Reality: Parallel Universes and the Deep Laws of the Cosmos* (Londres: Allen Lane; Nueva York: Alfred A. Knopf, 2011). Versión en castellano: *La realidad oculta: universos paralelos y las profundas leyes del cosmos*; trad. de Javier García Sanz (Barcelona: Crítica, 2011).

Michio Kaku, *Hyperspace: A Scientific Odyssey through Parallel Universes, Time Warps, and the 10th Dimension* (Oxford y Nueva York: Oxford University Press, 1994). Versión en castellano: *Hiperespacio: una odisea científica a través de universos paralelos, distorsiones del tiempo y la décima dimensión*; trad. de Javier García Sanz (Barcelona: Crítica, 2016).

Abraham Pais, «*Subtle is the Lord…»: The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford y Nueva York: Oxford University Press, 1982). Versión en castellano: *El señor es sutil: la ciencia y la vida de Albert Einstein*; trad. de Fidel Alsina (Barcelona: Ariel,

1984).

Christopher Ray, *Time, Space and Philosophy* (Londres y Nueva York: Routledge, 1991).

Wolfgang Rindler, *Introduction to Special Relativity*, Oxford Science Publications (Oxford y Nueva York: Clarendon Press, 1982).

Edwin F. Taylor y John Archibald Wheeler, *Spacetime Physics* (Nueva York: W. H. Freeman, 1992); descarga gratuita en: http://www.eftaylor.com/spacetimephysics/.

Max Tegmark, Our Mathematical Universe: My Quest for the Ultimate Nature of Reality (Londres: Allen Lane; Nueva York: Alfred A. Knopf, 2014). Versión en castellano: *Nuestro universo matemático: en busca de la naturaleza última de la realidad*; trad. de Dulcinea Otero-Piñeiro (Barcelona: Antoni Bosch, 2014).

Kip S. Thorne, *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy* (Nueva York y Londres: W. W. Norton, 1994). Versión en castellano: *Agujeros negros y tiempo curvo: el escandaloso legado de Einstein*; trad. de Javier García Sanz (Barcelona: Crítica, 1995).

Termodinámica e información

Brian Clegg, *Professor Maxwell's Duplicitous Demon: The Life and Science of James Clerk Maxwell* (Londres: Icon Books, 2019).

Paul Davies, *The Demon in the Machine: How Hidden Webs of Information Are Finally Solving the Mystery of Life* (Londres: Allen Lane; Nueva York: Penguin, 2019).

Harvey S. Leff y Andrew F. Rex, editores, *Maxwell's Demon: Entropy, Information, Computing* (Princeton, Nueva Jersey: Princeton University Press, 1990).

La naturaleza del tiempo

Julian Barbour, *The End of Time: The Next Revolution in Physics* (Oxford y Nueva York: Oxford University Press, 1999).

Peter Coveney y Roger Highfield, *The Arrow of Time: A Voyage through Science to Solve Time's Greatest Mystery* (Londres: W. H. Allen; Harper Collins, 1990). Versión en castellano: *La flecha del tiempo*; trad. de María Buxo Dulce-Montesinos (Barcelona: RBA, 2004).

P .C. W. Davies, *The Physics of Time Asymmetry* (Guildford, RU: Surrey University Press; Berkeley, California: University of California Press, 1974).

James Gleick, *Time Travel: A History* (Londres: 4th Estate; Nueva York: Pantheon, 2016). Versión en castellano: *Viajar en el tiempo*; trad. de Yolanda Fontal (Barcelona: Crítica, 2017).

Carlo Rovelli, *The Order of Time*; trad. al inglés de Simon Carnell y Erica Segre (Londres: Allen Lane; Nueva York: Riverhead, 2018). Versión en castellano: *El orden del tiempo*; trad. de Francisco J. Ramos Mena (Barcelona: Anagrama, 2018).

Lee Smolin, *Time Reborn: From the Crisis in Physics to the Future of the Universe* (Londres: Allen Lane; Boston y Nueva York: Houghton Mifflin Harcourt, 2013).

Unificación

Marcus Chown, *The Ascent of Gravity: The Quest to Understand the Force that Explains Everything* (Nueva York: Pegasus, 2017; Londres: Weidenfeld and Nicolson, 2018).

Frank Close, *The Infinity Puzzle: The Personalities, Politics, and Extraordinary Science behind the Higgs Boson* (Oxford: Oxford University Press; Nueva York: Basic Books, 2011).

Brian Greene, *The Elegant Universe: Superstrings, Hidden Dimensions, and the Quest for the Ultimate Theory* (Londres: Jonathan Cape; Nueva York: W. W. Norton, 1999). Versión en castellano: *El universo elegante: supercuerdas, dimensiones ocultas y la búsqueda de una teoría final*; trad. de Mercedes

García Garmilla (Barcelona: Crítica, 2012).

Lisa Randall, *Knocking on Heaven's Door: How Physics and Scientific Thinking Illuminate the Universe and the Modern World* (Londres: Bodley Head; Nueva York: Ecco, 2011). Versión en castellano: *Llamando a las puertas del cielo: cómo la física y el pensamiento científico iluminan el universo y el mundo moderno*; trad. de Javier García Sanz (Barcelona: Acantilado, 2013).

Carlo Rovelli, *Reality Is Not What It Seems: The Journey to Quantum Gravity*; trad. al inglés de Simon Carnell y Erica Segre (Londres: Allen Lane, 2016; Nueva York: Riverhead, 2017). Versión en castellano: *La realidad no es lo que parece: la estructura elemental de las cosas*; trad. de Juan Manuel Salmerón Arjona (Barcelona: Tusquets, 2015).

Lee Smolin, *Three Roads to Quantum Gravity* (Londres: Weidenfeld and Nicolson, 2000; Nueva York: Basic Books, 2001).

Lee Smolin, *Einstein's Unfinished Revolution: The Search for What Lies Beyond the Quantum* (Londres: Allen Lane; Nueva York: Penguin, 2019).

Leonard Susskind, *The Cosmic Landscape: String Theory and the Illusion of Intelligent Design* (Nueva York: Little, Brown and Co., 2005). Versión en castellano: *El paisaje cósmico: teoría de cuerdas y el mito del diseño inteligente*; trad. de Javier García Sanz (Barcelona: Crítica, 2007).

Frank Wilczek, *The Lightness of Being: Mass, Ether, and the Unification of Forces* (Londres: Basic Books, 2008).

Jameel Sadik «Jim» Al-Khalili (nacido el 20 de septiembre de 1962) es un físico teórico, autor y locutor iraquí-británico. Es profesor de física teórica y catedrático de participación pública en la ciencia en la Universidad de Surrey. Es locutor y presentador habitual de programas científicos en la radio y televisión de la BBC, y comentarista frecuente sobre ciencia en otros medios británicos.

Su interés actual está en los sistemas cuánticos abiertos y la aplicación de la mecánica cuántica en biología. En 2018, ayudó a establecer en Surrey el primer centro de formación doctoral en biología cuántica del mundo y, en 2020, creó un nuevo Centro de Fundamentos Cuánticos.

Jim es un destacado autor y ha escrito 14 libros sobre divulgación científica e historia de la ciencia, traducidos en total a veintiséis idiomas.

Notas

[1] Más adelante explicaré, por supuesto, lo que implican estas ideas. < <

[2] También esto lo explicaré más adelante. < <

[3] Douglas Adams, *The Salmon of Doubt: Hitchhiking the Galaxy One Last Time* (Nueva York: Harmony, 2002), 99. < <

[4] Así rezaba el título de un artículo que Hawking escribió en 1981: S. W. Hawking, «Is the end in sight for theoretical physics?», *Physics Bulletin* 32, núm. 1 (1981): 15-17. < <

[5] Por supuesto, la belleza no debe asociarse tan solo a la sencillez. Igual que con las obras de arte o de música supremas, también puede haber belleza en la enorme complejidad de algunos fenómenos físicos. < <

[6] En rigor debería añadir que durante las últimas dos décadas ha surgido una disciplina nueva denominada filosofía experimental. <<

[7] Sin duda los especialistas en historia de la ciencia cuestionarán esta afirmación simplista. Galileo no implantó de repente el heliocentrismo con sus observaciones y en realidad solo aportó datos sugerentes (como que Júpiter tiene satélites). < <

[8] Cita de la célebre obra de Galileo titulada *Il Saggiatore* (*El ensayador;* trad. al castellano de J. M. Revuelta), publicada en Roma en 1623. < <

[9] La luz más lejana que alcanzamos a ver, procedente del borde del universo observable, lleva viajando en nuestra dirección más de 13 000 millones de años y, por tanto, nos revela cómo era el universo en sus comienzos. Sin embargo, debido a la expansión del espacio, el origen del que partió esta luz se encuentra ahora a una distancia mucho mayor que 13 000 millones de años-luz. < <

[10] Hay más attosegundos en un solo segundo que la cantidad de segundos transcurridos desde la Gran Explosión. < <

[11] En realidad, el trabajo de Robert Hooke sobre la gravitación fue anterior al de Newton. < <

[12] Utilizo aquí este vocablo en términos muy generales y no con el sentido más específico que le atribuyen algunos especialistas en física que trabajan en el campo de la mecánica estadística. En esta disciplina, el término «universalidad», introducido en la década de 1960 por el físico estadounidense Leo Kadanoff, se corresponde con la observación de que hay propiedades de ciertos sistemas físicos que no dependen de su estructura y dinámica específicas, sino que se pueden deducir a partir de unos cuantos parámetros globales. <<

[13] En este artículo científico publicado en 1972 [P. W. Anderson, *Science* 177 (4047): 393-396], Anderson argumentaba en contra del reduccionismo extremo. Para ello recurrió al ejemplo de la jerarquía de las disciplinas científicas dispuestas por orden lineal, desde la física, como la ciencia más «fundamental» de todas, hasta la química, la biología, la sicología y las ciencias sociales. Esta jerarquía no implicaba, decía él, que una materia fuera una mera versión aplicada de la que estaba por debajo de ella, puesto que «en cada nivel se necesitan leyes, conceptos y generalizaciones completamente nuevos, lo que exige un grado de inspiración y creatividad idéntico al requerido en el nivel anterior. La sicología no es mera biología aplicada, ni la biología es mera química aplicada». Como argumento contra el reduccionismo me parece un tanto débil. El hecho de que un concepto sea o no fundamental no depende de su profundidad, ni de cuánta inspiración o creatividad se precisen para comprenderlo. < <

[14] Fragmento extraído de la obra *Méditations touchat la philosophie première,* de René Descartes, y traducido directamente del francés. *(N. de la T.)* < <

[15] Este es un detalle técnico. Básicamente la relatividad general contempla sistemas de referencia no inerciales donde el espacio-tiempo aparece curvado debido a la gravitación o la aceleración. En estos sistemas no inerciales solo se mide la luz con una velocidad constante cuando pasa cerca del sujeto. < <

[16] La velocidad de la luz en el espacio vacío asciende a 1 079 252 848.8 millones de km/h. < <

[17] Además de las ternas de cuarks que conforman los nucleones, también se dan combinaciones por pares (en rigor formados por cuarks y anticuarks) para dar lugar a otra clase de partículas llamadas mesones. Aún no se sabe con seguridad si los cuarks se pueden combinar para generar otras partículas compuestas exóticas, como los denominados tetracuarks, que estarían formados por dos cuarks y dos anticuarks, o los pentacuarks, consistentes en cuatro cuarks y un anticuark. < <

[18] Nótese que he empleado la palabra «masa» aquí. Si nos centramos en el número de átomos que hay en el universo, alrededor del 92 % es de hidrógeno y solo el 8 % es de helio (porque el helio tiene cuatro veces más masa que el hidrógeno). <<

[19] Las partículas alfa son núcleos de helio, el segundo elemento más ligero de todos después del hidrógeno. Consisten en cuatro nucleones: dos protones y dos neutrones. < <

[20] La otra clase de partículas, las portadoras de fuerza, como los fotones, se denominan bosones y en teoría no cuentan con antipartículas. < <

[21] Desde un punto de vista técnico, el proceso implica varios pasos, incluida la desintegración beta de protones en neutrones. <<

[22] En realidad el empleo del término *orbitar* no es correcto aquí, puesto que los átomos no son sistemas solares en miniatura ni los electrones son partículas localizadas como planetas diminutos en órbita alrededor de una estrella. < <

[23] Desde luego, mis compañeros adeptos a la interpretación de Copenhague discreparían enérgicos de esta afirmación mía. Dirían que sí comprenden todo lo que hay que entender sobre lo que la mecánica cuántica puede revelarnos o no, y que son los realistas quienes se niegan a aceptar o a entender esto. < <

[24] Aunque algunas interpretaciones realistas, como los modelos del colapso espontáneo, arrojan predicciones que otras no hacen y, por tanto, son, en principio, comprobables. < <

[25] Por supuesto, si manejamos cantidades pequeñas de moléculas la gravedad nunca llegará a controlar su comportamiento. Su masa acumulativa solo puede ejercer algún influjo cuando se ven implicadas cantidades inmensas de ellas. < <

[26] Por supuesto, hay cosas más probables que otras… Yo estoy seguro casi por completo de que el Sol saldrá mañana y de que seré un día más viejo; y también estoy bastante seguro de que no me levantaré de la cama siendo capaz de hablar japonés con fluidez ni de correr cien metros en menos de diez segundos. < <

[27] Ya que depende de qué interpretación de la mecánica cuántica se escoja. < <

[28] Aunque bien podrían haberse llamado igualmente «izquierda» y «derecha», «blanco» y «negro» o «yin» y «yang» para indicar que son opuestas entre sí. < <

[29] La otra clase de partículas formadas por cuarks, llamadas mesones, contienen un cuark y un anticuark, y ambos deben tener la misma carga de color porque las antipartículas siempre portan las mismas propiedades pero opuestas. De modo que podríamos tener un mesón compuesto por un cuark rojo (de la variedad que sea, como arriba, abajo o extraño) y por un cuark antirrojo de cualquier otra variedad. La variedad del cuark y del anticuark define el tipo de mesón, mientras que el color y el anticolor se cancelan entre sí para garantizar una partícula incolora. ¿Complicado? ¡Ya lo creo que sí! < <

[30] Por supuesto hay partículas materiales, como los neutrinos, que tampoco reaccionan ante los efectos de la fuerza electromagnética. Sin embargo, sí que interaccionan con otros tipos de materia a través de la fuerza nuclear débil y, por tanto, no se corresponden con lo que denominamos materia oscura. Hasta es posible que en algún momento lleguemos a detectar cierta interacción de la propia materia oscura a través de alguna de las otras tres fuerzas de la naturaleza, pero en ese caso se trataría de una interacción muy leve sin duda (porque en caso contrario ya la habríamos medido a estas alturas). La comunidad de físicos aún no ha renunciado por completo a la esperanza de que se dé esa pequeña interacción no gravitatoria, puesto que eso aumentaría las posibilidades de que las partículas de materia oscura se logren detectar o crear en un acelerador. < <

[31] Este satélite, llamado así por su acrónimo en inglés de *Cosmic Background Explorer* y también conocido como Explorer 66, se usó para la investigación en cosmología y estuvo operativo de 1989 a 1993. Su misión consistió en investigar la radiación del fondo cósmico de microondas del universo. < <

[32] Acrónimo de *weakly interacting massive particles*, «partículas masivas de interacción débil». < <

[33] Acrónimo de *gravitationally interacting massive particles*, «partículas masivas de interacción gravitatoria». < <

[34] Es difícil hacerse una idea de a qué nos referimos con un espacio tridimensional «plano». La forma más fácil de concebirlo consiste en imaginar que restringimos el espacio a tan solo dos dimensiones. Así se ve con claridad que la página de un libro es plana, mientras que la superficie de un balón no lo es. <<

[35] Por supuesto, esta energía no regresa a los músculos de los brazos, sino que se pierde en forma de calor residual en los alrededores del globo. < <

[36] Esto es así porque, según la mecánica cuántica, el tiempo es reversible. Por tanto, igual que un estado cuántico actual determina de un modo único un estado futuro, también un estado cuántico futuro debería determinar de manera única un estado pretérito. Pero esto no sería posible si se destruye la información contenida en ese estado. < <

[37] Siglas que equivalen a *anti-de Sitter/conformal field theory correspondence,* «correspondencia anti-de Sitter/teoría de campos conforme». < <

[38] Tal vez nos informe de que la respuesta correcta es, en efecto, 42. < <

[39] Por supuesto, no estoy proclamando que ese discernimiento y esos conocimientos se deban en exclusiva a las personas que se han dedicado a la física, puesto que podría decirse lo mismo en un libro sobre química, ingeniería o matemáticas. < <

[40] Estoy pensando aquí en el concepto de teoría dentro de las ciencias naturales, no, por ejemplo, en el ámbito de la economía o la sicología. < <